

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Visão artificial na inspeção e caraterização de defeitos superficiais em peças fundidas

João Daniel Amaral Martins

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. João Manuel R.S. Tavares, FEUP

Coorientador: Eng. Valter Costa, INEGI

11 de Outubro de 2018

Visão artificial na inspeção e caracterização de defeitos superficiais em peças fundidas

João Daniel Amaral Martins

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Resumo

Com o crescimento da indústria, a necessidade de automatização de processos industriais aumenta, como é o caso da inspecção das peças resultantes da produção numa fábrica. Nesta Dissertação é realizada uma primeira abordagem à automação do processo de inspecção visual das peças resultantes da fundição de alumínio. Deste modo, pretende-se detectar os defeitos superficiais existentes em peças de alumínio, tendo como principal objectivo a detecção de defeitos superficiais em puxadores de alumínio. Para atingir o objectivo proposto, foram necessários conhecimentos de diferentes áreas, tais como a mecânica, a electrónica e a informática, para realizar este trabalho que inclui: (i) desenho de uma plataforma de testes e (ii) estudo das técnicas de iluminação para detecção de defeitos superficiais. A plataforma de testes engloba o desenho de um sistema mecânico modular como suporte para as peças de alumínio, automatização desse sistema mecânico, escolha da câmara necessária para aquisição de imagem e implementação de métodos de iluminação do estado da arte (*Domo* e *Dark Field Ring*). Quanto ao sistema de iluminação, a abordagem feita incluiu o teste de seis diferentes técnicas de iluminação culminando na caracterização de cada método de iluminação tendo em conta o tipo de defeito a ser detectado. Como principais resultados deste trabalho assinalam-se: a criação de um sistema modular de testes para peças de alumínio, a criação de uma base de dados de imagens de defeitos superficiais em puxadores de alumínio e a geração de um quadro resumo de apoio à decisão do sistema de iluminação adequado tendo em conta o tipo de defeito a detectar. Para além disso, foram ainda testados alguns métodos de visão artificial para segmentação de defeitos nas imagens obtidas.

Abstract

With the ongoing industry growth, the demand to automate industrial procedures increase. One example is the visual inspection of manufactured parts. In this work a first approach to automate visual inspection in aluminum casted parts is conducted. Within this context, the main goal of this work is the characterization and detection of aluminum casted handles' defects. To achieve the aforementioned goal, the development process included: (i) developing a test platform, and (ii) the study of the optimal lighting techniques in order to identify different types of superficial defects. The test platform comprises the designing of a modular mechanical system as a supporting structure for the aluminum parts, automation of the mechanical structure, the choice of the appropriate camera for image acquisition and the implementation of two lighting techniques found in the state of the art (dome and dark field ring). In order to infer the most adequate lighting technique to detect different types of superficial defects, several tests with six different types of illumination were conducted. The main results of this work include: the assembly of a modular testing system for aluminum parts, the generation of an image database containing images of superficial defects in the aluminum casted handles, and the creation of a summary table to assist the decision of the appropriate lighting technique considering the type of defect to be detected. Moreover, a preliminary image processing approach to segment some defects in the obtained images was performed.

Agradecimentos

Queria agradecer em primeiro lugar ao Professor João Manuel Tavares, por toda a orientação que me foi dado ao longo desta dissertação. Um agradecimento especial ao Engenheiro Valter Costa, do INEGI, que esteve sempre disponível e que muito me ensinou no decorrer de todo este trabalho. Também aos membros da UTAF, do INEGI, gostaria de agradecer o acolhimento nestes meses de trabalho, e toda a ajuda dada, em especial pelos Engenheiros Isaac Ferreira e Margarida Machado. Ao INEGI, por me ter proporcionado a oportunidade e as condições para a realização desta dissertação. Agradecer também ao Sérgio Fonseca, da STA/Sofi, pela disponibilidade que teve no arranque deste projecto e pelas amostras fornecidas para teste. Por fim, ao Vitor Medeiros, da Infaimon, pelo apoio prestado na escolha dos componentes e por todo o material que foi emprestado.

João Martins

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento da Dissertação	1
1.2	Objectivos e metodologia seguida	1
1.3	Organização da Dissertação	2
2	Fundamentos e Estado da Arte	3
2.1	Visão Artificial	3
2.2	Visão Artificial na inspecção de peças de Alumínio	4
2.3	Processamento de Imagem	5
2.4	Métodos de Iluminação	6
2.5	Técnicas de Iluminação mais utilizadas actualmente	7
2.6	<i>Setups</i> de sistemas de Visão Artificial	12
2.7	Conclusão	13
3	Desenvolvimento de um sistema electromecânico de inspecção por Visão Artificial	15
3.1	Definição do problema e requisitos	15
3.1.1	Processo de fabrico e inspecção na STA	15
3.1.2	Amostras utilizadas	16
3.1.3	Outros Requisitos	17
3.2	Escolha da Câmara	18
3.2.1	Projecto em que se insere e projectos futuros	18
3.2.2	Características a considerar	18
3.2.3	Escolha do Sensor	19
3.2.4	Escolha da Lente	23
3.3	Iluminação do sistema de Visão Artificial	27
3.3.1	Escolha de um sistema de iluminação	27
3.3.2	Projecto do sistema de iluminação	28
3.3.3	Teste de técnicas de iluminação	30
3.4	Projecto do Sistema Mecânico	38
3.4.1	Requisitos	38
3.4.2	Estrutura Mecânica	38
3.4.3	Métodos de fabrico das peças	42
3.4.4	Pormenores de construção	42
3.4.5	Sequência de montagem	51
3.4.6	Soluções de iluminação construídas	53
3.5	Sistema Electrónico	55
3.5.1	Funcionamento dos motores	55
3.5.2	Escolha do método de controlo	56

3.5.3	<i>Drivers</i> dos motores	57
3.5.4	Fim de curso	58
3.5.5	Alimentação do sistema Eléctrico	59
3.5.6	Circuito Eléctrico	59
3.5.7	Programação do sistema electromecânico	60
3.5.8	Funcionamento da câmara	65
3.6	Conclusão	70
4	Teste experimental e discussão de resultados	71
4.1	Estudo da aplicação da Visão Artificial efectuado às amostras fornecidas	71
4.1.1	Metodologia de teste	71
4.2	Validação do Sistema electromecânico de testes projectado	78
4.3	Aplicação das técnicas de iluminação	78
4.3.1	Resultado da aplicação das diferentes técnicas	78
4.3.2	Imagens obtidas pela câmara	79
4.3.3	Técnicas com maior alcance	85
4.3.4	Utilização de técnicas de processamento de imagem	87
4.4	Conclusão	92
5	Conclusões e Trabalho Futuro	93
5.1	Cumprimento dos Objectivos	93
5.2	Trabalhos Futuros	94
A	Definições operacionais - Padrões Visuais - STA	95
B	Desenho Técnico 1907-211.2	111
C	Desenho Técnico - 82000.2AG	113
D	Datasheet da câmara IDS uEYE 3270	115
E	Desenho geral do sistema mecânico	119
F	Desenho do anel projectado	121
G	Desenho do Domo projectado	123
H	Programa utilizado em testes iniciais, apenas para comando da fita de LED, utilizado no Arduino	125
I	Programa completo de comando de luzes e controlo dos motores, utilizado no Arduino	129
J	Script da Câmara em Python	137

Lista de Figuras

2.1	Comparação de várias fontes de iluminação e suas vantagens.	7
2.2	Principais posições da iluminação, que a dividem em 3 grupos. a) <i>bright field</i> , b) <i>dark field</i> , c) <i>backlight</i>	8
2.3	Esquema de Iluminação Directa.	9
2.4	Esquema de Iluminação utilizando um Domo e respectivo efeito numa superfície.	10
2.5	Esquema de Iluminação Co-Axial e efeito numa superfície.	10
2.6	Esquema de Iluminação tangencial.	11
2.7	Esquema de iluminação utilizando um Dark Field Ring	11
2.8	Esquema de uma iluminação <i>Backlight</i>	12
3.1	Modelos de puxadores disponíveis para teste: a) modelo 1907-211.2 (modelo escolhido); b) modelo 82000.2AG.	16
3.2	Fotografia do modelo da câmara escolhido, que inclui o sensor e o encapsulamento.	24
3.3	Cálculo dos valores para o FOV, utilizando a ferramenta do fabricante do sensor.	25
3.4	Fotografia do modelo de lente escolhido	26
3.5	<i>Setup</i> utilizado no teste inicial, representando neste caso a utilização da técnica de iluminação directa.	30
3.6	Esquema das iluminações utilizadas (A camada cinzenta do lado direito da caixa representa o papel de alumínio utilizado): a) indirecta semi-difusa utilizada; b) em anel, simulando o efeito de um Domo; c) em anel, utilizando o efeito de <i>Dark Field</i>	32
3.7	Resultados da utilização das diferentes aberturas da íris: a) F=12; b) F=8; c) F=6	33
3.8	Resultados para a peça 1: a) utilizando a técnica de iluminação indirecta semi-difusa; b) aplicando a técnica de <i>Dark Field</i>	34
3.9	Resultados das duas faces da peça 2: a) face frontal, utilizando a iluminação directa; b) face lateral, utilizando a iluminação indirecta.	35
3.10	Comparação de utilização das duas melhores técnicas para a peça 3: a) iluminação directa; b) iluminação indirecta, tipo Domo.	35
3.11	Resultados para a peça 4: a) utilizando a técnica tipo Domo; b) utilizando a iluminação indirecta.	36
3.12	Resultados para a peça 5, utilizando a técnica tipo Domo	36
3.13	Resultados conseguidos pela Infaimon, utilizando uma <i>Backlight</i> de alta intensidade numa tentativa de conseguir realçar os diferentes defeitos: a) pancadas; b) poros; c) manchas.	37
3.14	Modelo CAD 3D da primeira iteração do sistema electromecânico a construir estando montados, para fins de demonstração, uma técnica de iluminação e um exemplo de um puxador.	40

3.15	Configuração final da estrutura mecânica: a) Modelo CAD 3D do sistema completo, com indicação da numeração dos motores; b) e c) Desenhos com as medidas de atravancamento gerais da estrutura.	41
3.16	Pormenor do sistema de fixação: a) posição de uso (fechado); b) aberta até ao máximo de amplitude.	43
3.17	Moldura de alumínio, antes da montagem.	44
3.18	Vistas do suporte da câmara: a) modelo 3D; b) fotografia após montagem	44
3.19	As quatro vistas que são possíveis com a rotação do motor 1: a) frente; b) lado direito; c) trás; d) lado esquerdo	45
3.20	As posições que se pretendem, utilizando o motor 2: a) posição normal; b) vista de cima; c) vista de baixo	46
3.21	Situação limite para a qual o motor 2 é projectado	47
3.22	Pormenor relativo aos acoplamentos feitos para transmissão do movimento do motor 2. Foram escondidos os perfis e o suporte do motor para que fosse mais clara a imagem.	49
3.23	Detalhe do veio de suporte adicional juntamente com as chapas que o seguram. .	49
3.24	Pormenor da montagem do motor 2 e o suporte impresso em 3D: a) posição do motor+acoplamento entre os perfis; b) vista de um lado do suporte do motor 2 apenas; c) vista do lado oposto do suporte do motor 2.	50
3.25	Detalhe da posição do fim-de-curso, na zona abaixo do motor 2: a) vista do suporte, no modelo 3D; b) fotografia do fim de curso montado	51
3.26	Fotografia do sistema após montagem: a) estrutura montada, caixa aberta; b) caixa fechada	52
3.27	Anel de <i>Dark Field</i> projectado: a) vista do anel inteiro; b) vista em corte.	53
3.28	Domo projectado: a) vista do anel inteiro; b) vista em corte.	54
3.29	Esquema eléctrico dos enrolamentos do motor Nema17, com o respectivo esquema de cores dos cabos	55
3.30	Esquema eléctrico dos enrolamentos do motor Nema23, com o respectivo esquema de cores dos cabo	56
3.31	Esquema de montagem dos componentes electrónicos à RAMPS 1.4.	57
3.32	Circuito de teste e limitação de corrente (I_{\max}) do <i>driver</i>	58
3.33	Esquema eléctrico do sistema completo.	60
3.34	Diagrama do funcionamento do <i>Arduino</i> , vista geral.	61
3.35	Disposição da parte electrónica principal: arduino+RAMPS 1.4 (ao centro, vermelho), juntamente com os botões (em baixo) e a fonte (em cima, à esquerda). . .	65
3.36	<i>Flowchart</i> do funcionamento de câmara.	66
4.1	Esquema com as medidas utilizadas no ajuste de posicionamento da câmara (WD = 250, H = 120,).	72
4.2	Exemplo de uma Siemens Star.	72
4.3	Disposição utilizada para a iluminação directa de ângulo alto.	74
4.4	Disposição utilizada para a iluminação directa de ângulo baixo: a) vista lateral; b) vista de cima.	74
4.5	Disposições utilizadas para a iluminação tangencial: a) e b) vista de cima; c) e d) vista lateral.	75
4.6	Disposição utilizada para a iluminação <i>Backlight</i>	75
4.7	Disposição utilizada para a iluminação com Domo.	76
4.8	Disposição utilizada para a iluminação <i>Dark Field Ring</i>	76

4.9	Resultado da peça 1, utilizando iluminação Domo (zona com defeitos assinalados com um círculo).	80
4.10	Resultado da peça 2, utilizando iluminação <i>Dark Field Ring</i> (zonas com defeitos assinalados com um círculo).	81
4.11	Resultado da peça 3, utilizando iluminação directa semi-difusa, de baixo ângulo (zona com defeitos assinalados com um círculo).	82
4.12	Resultado para os diferentes defeitos na peça 4 (zonas com defeitos assinalados com um círculo): a) utilizando a respectiva de Domo na face de cima; b) utilizando a técnica de <i>Dark Field Ring</i> na face da frente.	83
4.13	Resultado da peça 5, utilizando iluminação directa semi-difusa, de baixo ângulo (zona com defeitos assinalados com um círculo).	84
4.14	Utilização da técnica de iluminação de Domo em diferentes peças (zonas com defeitos assinalados com um círculo): a) face lateral da peça 1; b) face lateral da peça 2; c) face frontal da peça 2; d) face frontal da peça 4.	85
4.15	Utilização da técnica de iluminação de <i>Dark Field Ring</i> em diferentes peças (zonas com defeitos assinalados com um círculo): a) face lateral da peça 1; b) face frontal da peça 2; c) face frontal da peça 4.	86
4.16	Comparação de imagens resultantes do processamento da face da peça 1.	87
4.17	Comparação de imagens resultantes do processamento da face da peça 2.	88
4.18	Comparação de imagens resultantes do processamento da face da peça 3: a) original; b) <i>threshold</i> simples; c) <i>threshold</i> adaptativo	89
4.19	Comparação de imagens resultantes do processamento das faces da peça 4: a) e c) os originais; b) e d) após processamento	90
4.20	Comparação de imagens resultantes do processamento da face da peça 5: a) original; b) após processamento	91

Lista de Tabelas

3.1	Características relevantes do computador utilizado nesta dissertação	17
3.2	Número mínimo de píxeis consoante o tipo de <i>feature</i> a detectar	21
3.3	Características do modelo de sensor escolhido	23
3.4	Características principais do modelo da lente escolhido.	26
3.5	Métodos de Iluminação a utilizar nos diferentes defeitos	29
3.6	Principais característica do motor Nema17 MT-1702HS133A	47
3.7	Principais característica do motor Nema23 MT-2303HS200AW	48
3.8	Principais característica do motor Nema17 MT-1702HS133A	55
3.9	Principais característica do motor Nema23 MT-2303HS200AW	55
4.1	Resumo dos resultados da utilização das diferentes técnicas de iluminação nas diferentes peças.	79

Abreviaturas e Símbolos

API	<i>Application Programming Interface</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i>
CMOS	<i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i>
f	Distância Focal
F	<i>F-number</i> , abertura da íris
FOV	<i>Field of View</i> (Campo de Visão)
FPS	<i>Frames por Segundo</i>
IV	Infravermelhos
LED	<i>Light Emission Diode</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SDK	<i>Software Development Kit</i>
STA	Sociedade Transformadora de Alumínios
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UTAF	Unidade de Tecnologias Avançadas de Fabrico
UV	Ultravioleta
VA	Visão Artificial
WD	<i>Work Distance</i> (Distância de Trabalho)

Capítulo 1

Introdução

1.1 Enquadramento da Dissertação

Esta dissertação advém do interesse de duas entidades, O INEGI e a STA. A STA é uma empresa que produz peças de alumínio de vários tipos, desde as mais técnicas até às mais corrente, utilizando como principal processo de fabrico a fundição. Por sua vez o INEGI, mais concretamente o núcleo da UTAF, especialista em fundição, presta apoio à STA, com objectivo de melhorar os processos de fundição utilizados. Ora, a certa altura, a STA propôs ao núcleo da UTAF que abordasse o tema da Visão Artificial para o controle de qualidade das suas peças fundidas. O núcleo da UTAF, aproveitando esta oportunidade explorar o tema da Visão Industrial, propôs esta dissertação.

O objectivo desta primeira abordagem será o de produzir um sistema simples que possa ser utilizado para testar a implementação de Visão Artificial em diversas peças. O sistema que será para construir deverá ter em conta também as necessidades do INEGI, mas mantendo como foco principal o tema deste trabalho: a inspecção de defeitos superficiais em peças fundidas. Serão, no entanto, feitas algumas considerações ao longo do trabalho que permitam outros possíveis usos do sistema, tendo em conta o enquadramento.

1.2 Objectivos e metodologia seguida

O que se pretende com este trabalho é fazer inicialmente uma caracterização das técnicas utilizadas hoje em dia na inspecção de peças fundidas de alumínio, para que depois se possa fazer um estudo dos métodos de Visão Artificial a ser aplicados no caso específico dos puxadores. Além disso, tenciona-se criar possíveis configurações para que seja estudada a inspecção de amostras, para que no fim se apliquem ferramentas de processamento de imagem para detectar os defeitos. A maneira como será abordado o problema é através de um estado da arte inicial, onde são explicadas as técnicas de inspecção, iluminação e processamento de imagem actualmente utilizadas. Será depois concebido um sistema mecânico para tornar tangíveis as possíveis configurações de

inspecção de peças, começando pelas partes mais influentes num sistema de Visão Artificial (câmara, iluminação) até ao projecto de um sistema completa, que inclui uma estrutura que permita albergar as técnicas que se pretendam utilizar e uma parte electrónica que controle iluminação e alguma movimentação necessária na estrutura referida. Após montagem do sistema proposto, serão efectuados testes de maneira a avaliar as melhores técnicas de iluminação para cada tipo de defeito, de maneira a obter imagens destes para posteriormente serem sujeitas a técnicas de segmentação.

1.3 Organização da Dissertação

O documento está organizado em cinco diferentes capítulos. Para além da introdução, será feito no capítulo 2 um levantamento dos trabalhos e artigos científicos relevantes para a elaboração desta dissertação, uma comparação das técnicas mais avançadas utilizadas hoje em dia, e uma fundamentação teórica que será utilizada nos capítulos subsequentes. No capítulo 3 será explicado o processo de desenvolvimento de todo o sistema construído, tanto a parte mecânica como a parte electrónica, explicando os motivos da escolha dos componentes, os pormenores construtivos e a programação feita. O capítulo 4 contém os testes que foram feitos às amostras fornecidas, mostrando o método utilizado, os resultados obtidos e a sua discussão. Por fim, o capítulo 5 dedica-se às conclusões do trabalho e a propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos e Estado da Arte

Antes de realizar a parte prática, é necessário estudar os princípios teóricos e o estado da arte. Para isso, nesta secção foram reunidos os principais conceitos existentes na bibliografia que permitam saber o que é a Visão Artificial, como é feita actualmente no caso do alumínio e como é projectado um sistema deste tipo (setup, iluminação, processamento de imagem).

2.1 Visão Artificial

A Inspeção Visual é um conceito que existe desde que o ser humano foi capaz de fabricar os seus próprios objectos, sendo apenas necessário observar a superfície deste para conseguir identificar falhas que pudessem prejudicar o objecto quer na parte estética, quer na parte funcional. Nos tempos modernos, grande parte das fábricas possuem algum controlo de qualidade, e isso passa por fazer uma avaliação às peças produzidas, procurando imperfeições ou incoerências geométricas (designados de "defeitos", notação utilizada no resto do trabalho). Quer seja por amostragem ou na totalidade das peças, os fabricantes recorrem frequentemente à Inspeção Visual utilizando um operador humano para realizar esta tarefa, utilizando a sua acuidade visual (normalmente treinada) num ambiente bem iluminado e manuseando a peça manualmente, rodando-a para tentar obter os melhores ângulos de incidência de luz que permitam a detecção dos defeitos.

Este método de avaliação das peças resultantes de fabrico faz parte de um grupo mais abrangente de técnicas utilizadas na indústria chamadas de Técnicas Não-Invasivas (ou Não-Destrutivas), que permitem a análise das propriedades de materiais, componentes e sistemas sem que lhes seja causado algum dano [1]. Para proteger as peças fabricadas, são utilizadas qualidades humanas ou algum tipo de sensores não-invasivos para encontrar as falhas existentes e assim evitar danos por estas causados. Por isso, integrar algum tipo de Inspeção durante os processos de fabrico torna-se essencial, especialmente nos casos mais propensos a defeitos superficiais [2].

O início da utilização desta tecnologia permitiu criar soluções inovadoras dentro da automação industrial, pelo que houve uma enorme quantidade de processos de fabrico que beneficiaram da implementação de técnicas automatizadas de inspeção, incluindo a produção de componentes mais delicados, circuitos integrados, e até peças metálicas, entre outros [1, 3, 4]. Nos últimos 10

anos, os sistemas de VA têm vindo a ser crescentemente implementados na indústria, de maneira a aumentar a eficiência dos processos de inspecção das peças. No entanto, quando o processo requer uma solução demasiado específica prefere-se a utilização da convencional inspecção manual, quer por motivos de investimento ou porque as soluções existentes no mercado simplesmente não conseguem dar resposta ao problema [5].

As principais vantagens de montar um sistema de visão artificial são [2,6]:

- Funcionamento contínuo;
- Objectividade e qualidade da inspecção das peças;
- Rapidez da avaliação;
- Obtenção de informações adicionais (medidas, nº de peças, etc.);
- Possibilitar a criação de uma base de dados das peças;
- Facilmente reprogramável;
- Outros factores, tais como: poupança de espaço, escalável.

2.2 Visão Artificial na inspecção de peças de Alumínio

No caso específico do alumínio, a VA é tipicamente utilizada para procurar riscos, poros e outros defeitos ou para fazer a avaliação de acabamentos da superfície após fabrico/maquinação [7]. Existem casos documentados de diversas aplicações, incluindo até o uso de Visão no processo de fundição utilizando medições de temperatura no espectro Infra-Vermelho [8]. Para este trabalho, interessa perceber os defeitos que existem na superfície das peças resultantes do processo de fundição e de que maneira conseguem ser detectados.

Os principais defeitos que podem ser encontrados na superfície de peças fundidas em alumínio resumem-se aos seguintes [9–12]:

- Bolhas de ar - aparecem como falta de material numa zona redonda ou oval. Geralmente aparecem em grupo e são provocados ou por gases emitidos pelo molde ou por gases resultantes da fusão do metal (raramente);
- Porosidades - semelhantes às bolhas mas de dimensão menor, costumam aparecer em grupos numerosos perto umas das outras, criando pequenas zonas de falha de material. Resultam de causas semelhantes às das bolhas de ar;
- Rechupes - com formas irregulares e superfícies ásperas. Provocados pela redução de volume do metal durante a solidificação, especialmente quando o molde é mal alimentado;
- Inclusões de escória - por serem de origens variadas podem ter diversos tamanhos e feitios. Ocorrem geralmente durante o vazamento;

- Inclusões do molde - são irregulares e podem ocorrer em qualquer lado. Devem-se à erosão do molde, que liberta material;
- Metal externo - No caso das ligas de alumínio ocorrem sob a forma de elementos de liga que não fundiram;
- Riscos - são causados por factores externos à fundição em si. Podem ocorrer em todas as etapas desde que a peça sai do molde até que sai da fábrica, de diversas maneiras.

Recentemente têm sido apresentadas várias soluções para detecção de defeitos superficiais no alumínio. Um deles é o uso de ultra-sons para avaliar o grau de porosidade do metal, ao medir o coeficiente de amortecimento e a velocidade dos ultra-sons [9]. Outra das técnicas é baseada no uso de Raio-X, o que torna o processo demasiado caro e de difícil adaptação a linhas de produção [9, 13], mas o uso de radioscopia tem sido vista como a melhor ferramenta de inspecção não destrutiva de peças em alumínio, especialmente quando se procuram defeitos que não estão à superfície [13–16]. Este método consiste, sumariamente, na utilização de uma fonte que emite raios-X que atravessam uma peça, recorrendo depois a um chamado "intensificador de imagem" que transforma a imagem de raio-X em radiação visível, para depois ser capturada por uma câmara [13]. O uso de câmaras no espectro do visível com o devido *setup* de iluminação são alternativas mais baratas e consegue obter bons resultados [9, 17]; no entanto, este tipo de solução é apenas utilizado em defeitos superficiais e em peças com geometrias simples, sendo normalmente apenas examinada uma face específica, onde o foco é detectar falhas nas partes funcionais da peça produzida [17, 18]. O facto de apenas procurar falhas numa zona específica da peça, ou em peças simples, permite uma mais fácil implementação da VA numa linha de montagem/produção [19, 20], sendo que em peças de geometria complexa o método manual continua a ser o preferido [1, 21].

2.3 Processamento de Imagem

Esta talvez seja a área onde tem havido uma mais recente avanço tecnológico, por haver uma maior margem para melhoria, no caso dos algoritmos e análise numérica das imagens. Além de reconhecimento estatístico de padrões [22, 23], já se começa a ver o uso de redes neuronais [24] e métodos de *machine learning* [24, 25] para detectar defeitos. Por causa do cor constante das superfícies metálicas, [10] utiliza matrizes modificadas de co-ocorrência de níveis de cinzento para se detectarem pequenas alterações na textura. No entanto, a base comum é primeiro processar uma imagem numericamente utilizando filtros de Gauss e *Laplace*, podendo ser combinados [24, 26] ou modificados [9], que permite detectar as arestas dos objectos. Outra maneira de conseguir detectar os contornos é utilização do método de *Canny* [25]. A técnica de segmentação comum a todos é o método de *thresholding*, seja ele variável ou global.

2.4 Métodos de Iluminação

A iluminação é muitas vezes sublinhada como o aspecto de maior importância num sistema de Visão Artificial, no entanto, enquanto que tem havido um grande interesse em melhorar tanto o hardware como o software utilizados na VA, o estado da arte relativo à iluminação a utilizar não evoluiu significativamente [21, 27]. Como os sensores das câmaras captam a luz de maneira diferente do olho humano [6] o sucesso, ou não, da Inspeção automática começa precisamente na maneira como é iluminado [2]. Para levar a cabo esta tarefa, o ponto de partida para um sistema de controlo de qualidade utilizando análise de imagem feita por computador é o dimensionamento de um sistema de iluminação que consiga fazer a distinção dos defeitos esperados na superfície [19, 28], ou seja, realçar os diferentes *features* do objecto e esconder os elementos indesejados na escuridão [21, 29]. Outras vantagens de um defeito bem iluminado são o impacto directo que tem ao nível de complexidade necessário nos algoritmos de inspecção, também pode ser utilizado para reduzir o impacto da luz ambiente, nos casos em que não se conseguir impedir a sua presença [21].

Como diferentes configurações de iluminação fazem sobressair diferentes *features* do objecto, a escolha da iluminação a utilizar é altamente individualizada para a aplicação que é pensada. Isto faz com que uma peça de uma determinada geometria com os seus defeitos específicos terá forçosamente uma configuração de iluminação ideal distinta de todas as outras. Portanto, se for pensada uma solução de VA para uma linha de produção, esta solução apenas irá contemplar a peça para a qual foi optimizada. No caso da linha ter a capacidade de produzir várias peças, cada uma terá que ter a sua iluminação exclusiva para poder ser correctamente inspeccionada [2, 6].

Um sistema de Iluminação, neste momento, não são apenas lâmpadas ou conjuntos LEDs apontados a um objecto, mas sim complexos conjuntos de vários componentes, tais como [6]:

- Fontes de luz;
- Elementos mecânicos de fixação e ajuste;
- Elementos ópticos de modificação da luz;
- Partes electrónicas para estabilização e controlo;
- *Software*, caso seja necessário;
- Cablagem necessária;

Historicamente, a evolução das fontes luz tem andado de mãos dadas com os avanços na iluminação de consumo; começou por ser utilizada a comum lâmpada de incandescência, passando pelo aparecimento dos tubos de Xenon (que permitia o efeito estroboscópico), depois pelas lâmpadas fluorescentes, e recentemente é corrente o uso de LEDs. O Xenon continua a ter algumas aplicações, especialmente em casos que necessitam de muito brilho mas, no espectro do visível, os LEDs dominam o mercado. Com os avanços na estabilidade, intensidade conseguida e baixo custo de produção, esta tecnologia conseguiu suplantá-la tanto às lâmpadas fluorescentes como às fontes de quartzo-halogénio (utilizadas com fibra óptica) [2, 27, 30].

Como se pode ver na comparação de principais características (Fig. 2.1), é apenas natural que os de LED sejam a ferramenta recomendada na projecção de sistemas de VA. As vantagens são imensas: tempo útil de vida elevado, vários comprimentos de onda disponíveis (e várias cores), parte electrónica estável e resistente, pouco consumo energético e baixa manutenção são alguns dos pontos que os autores focam para justificar a preferência dos LEDs. Outros dos aspectos que facilitaram a entrada desta tecnologia no mundo da VA foram o tamanho, fácil programação e a facilidade que existe em criar conjuntos de LEDs de vários formatos. Por isso, foi possível a criação de novas técnicas de iluminação, facilmente comerciáveis e adaptáveis aos diferentes problemas existentes [2, 6, 31, 32].

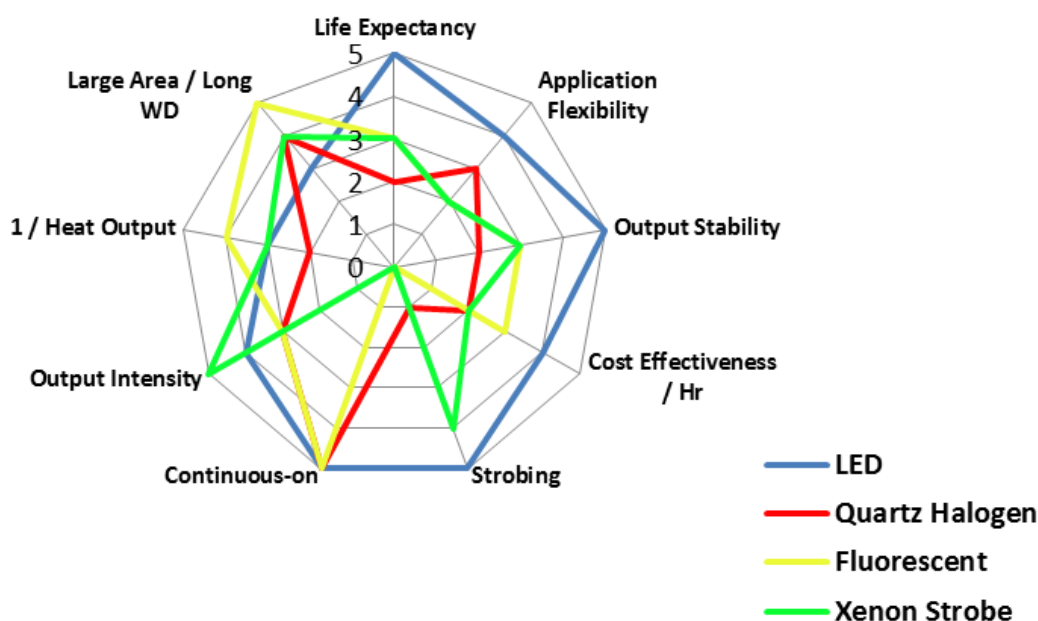


Figura 2.1: Comparação de várias fontes de iluminação e suas vantagens [32].

Em relação aos elementos de modificação da luz, isto refere-se à possibilidade de aplicar algum tipo de filtros ou lentes, consoante o resultado desejado. Existe um vasto leque de possibilidades, desde filtros para o controle da cor (que permite identificar regiões específicas em objectos coloridos), filtros para polarização da luz (que apenas deixam atravessar a luz numa orientação específica, ideal para peças transparentes e reflectoras), difusores (espalhar uniformemente a luz) e filtros para remover luz a partir de certos comprimentos de onda (infravermelhos, UV, etc.) [2].

2.5 Técnicas de Iluminação mais utilizadas actualmente

Em termos de técnicas, alguns autores dividem os tipos de Iluminação em três grandes grupos: 1) *bright field*, 2) *dark field* e 3) *backlight*. Cada uma destas categorias referem-se à posição da fonte de luz em relação ao plano do objecto a iluminar, que resulta em diferentes ângulos de incidência [4, 21, 33], como se pode ver na fig. 2.2.

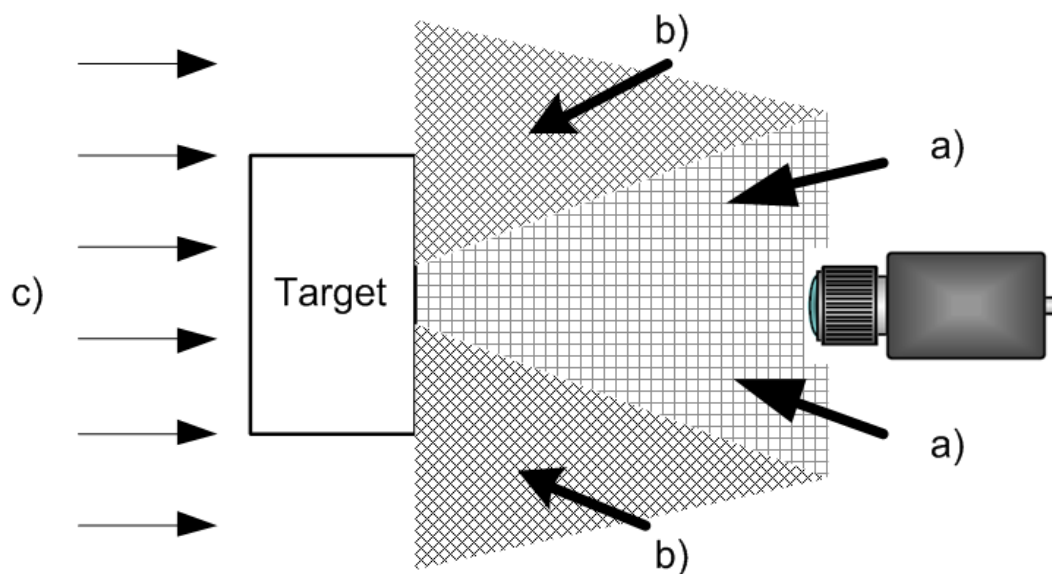


Figura 2.2: Principais posições da iluminação, que a dividem em 3 grupos. **a)** *bright field*, **b)** *dark field*, **c)** *backlight* [32].

O *Bright Field Illumination* consiste no grupo de técnicas que pretende espalhar a iluminação pela superfície a capturar, tornando-a visível e clara (*bright*) e os defeitos aparecem como sombras na imagem. Pode ser utilizada como *partial bright field* (também chamada de *Directional Lighting*), no caso da fonte de luz ser direccional e apenas iluminar a área do objecto, e que pode ser definida como a iluminação directa, comum, a que estamos habituados. Ou pode ser utilizada como *Full Bright Field*, quando a iluminação consegue ser uniforme em toda a superfície, como é o caso de iluminação tipo difusa [4, 21].

No caso do *Dark Field*, este é um método que faz incidir luz numa superfície com um ângulo de incidência baixo. O princípio de *Dark Field* assenta no facto de que, devido ao ângulo de iluminação, grande parte da luz incidente numa superfície seja reflectida para fora do campo de visão da câmara, fazendo com que a imagem não tenha excesso de luz provocado pela reflexão. Utilizado normalmente em faces planas, o resultado desta técnica é que a luz apenas é reflectida pelas irregularidades da superfície da face, sendo que esta aparece escurecida [34, 35].

O *Backlight* (em Português, Iluminação por trás) consiste em, tal como indica o nome, ter uma fonte de iluminação por trás do objecto virada para a câmara. Deste modo, toda a superfície do objecto aparece a escuro, exceptuando furos passantes e superfícies transparente que tenha [30].

As principais técnicas utilizadas na indústria serão sumarizadas de seguida, com as suas características, vantagens e requisitos. Existem, claro outras técnicas e variações das que são faladas aqui, mas como ponto de partida serão explicadas as de uso mais comum e que abrangem o maior número de casos de uso.

Iluminação Directa

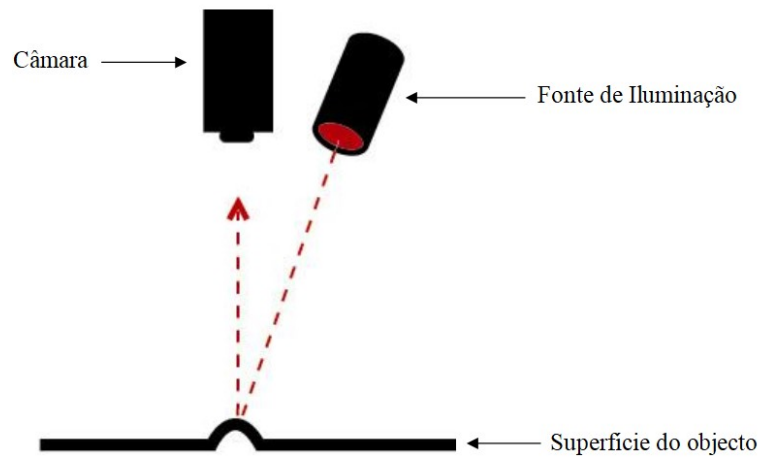


Figura 2.3: Esquema de Iluminação Directa [32].

Fazendo parte do primeiro grupo, é a forma mais comum de iluminação em aplicações de VA, pois há um grande leque de defeitos que conseguem ser detectados com uma iluminação directa, além de ser mais agradável para um operador. Utilizada em aplicações com alto contraste entre os elementos a detectar e o resto do objecto. É de fácil montagem e não tem máximo de WD (limitado apenas pela intensidade necessária no objecto), o que permite ser integrado num maior leque de soluções. De notar, no entanto, que a utilização em superfícies que sejam reflectoras faz com que se criem "manchas" no objecto, partes que ficam mais iluminadas que outras [32, 34].

Iluminação em Domo

Esta técnica, mostrada esquematicamente na fig. 2.4, utiliza o conceito de iluminação indirecta, ao montar uma cúpula redonda ("Domo") por cima de um conjunto de LEDs. Pode ser uma semi-esfera ou semi-cilíndrica, dependendo da geometria do objecto a ser inspeccionado. A forma arredondada desta configuração permite que a luz seja uniformemente distribuída pela superfície onde incide, retirando a proeminência da textura da superfície e evitando possíveis zonas de reflexão em objectos mais polidos. Ideal para peças cujo brilho impeça de serem vistos os pormenores procurados. São necessárias preocupações para a implementação, porque o Domo tem que ficar perto da peça, e a câmara perto do orifício superior deste; além disso, é preciso ter em conta do facto da mancha de luz uniforme produzida seja metade do diâmetro do Domo, o que pode fazer aumentar demasiado as dimensões do sistema de Iluminação [31, 32, 34].

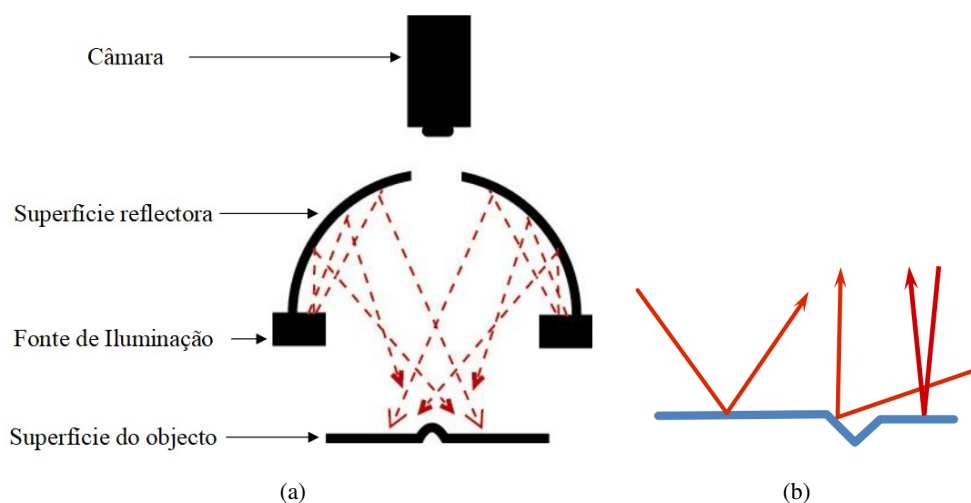


Figura 2.4: Esquema de Iluminação utilizando um Domo e respectivo efeito numa superfície [32].

Iluminação Co-Axial Difusa

Este método de iluminação indirecta utiliza um sistema que faz passar a luz por uma lente difusora para depois ser reflectida, em parte, por um espelho divisor (fig. 2.5). Isto permite que a luz projectada na superfície seja quase uniforme, e a forma como é reflectida por esta faça sobressair a sua textura e diferenças de altura existente. Tem o mesmo problema de implementação do Domo, por causa do tamanho do sistema LED+difusor+espelho e porque precisa de estar perto do objecto, e tem ainda o problema adicional de "perder" uma grande quantidade da luz vinda da superfície [31, 32, 34].

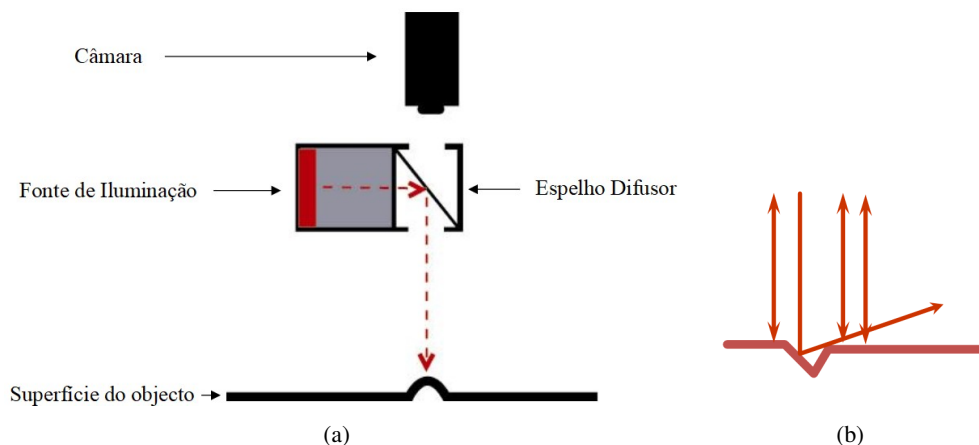


Figura 2.5: Esquema de Iluminação Co-Axial e efeito numa superfície [32].

Iluminação Tangencial

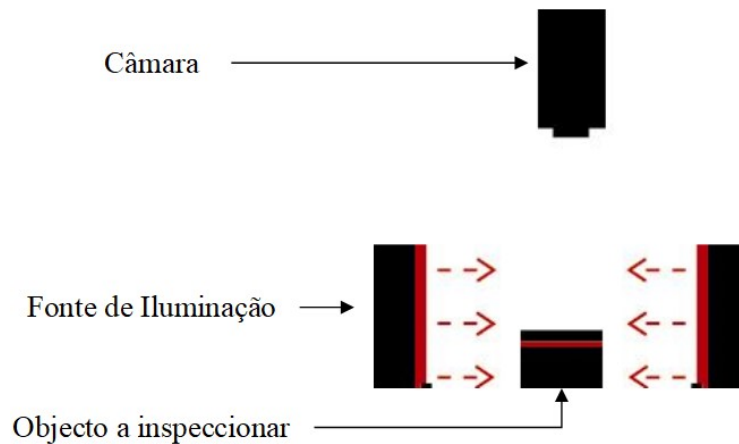


Figura 2.6: Esquema de Iluminação tangencial [32].

Esta é uma das aplicações da técnica de *Dark Field*, com o objectivo de utilizar a luz na direcção paralela à face da peça, como mostra o esquema da fig. 2.6. Como a luz passa rasante à face, e seguindo os princípios do *Dark Field*, permite evidenciar arestas e irregularidades em superfícies reflectoras. Utilizam-se barras de LEDs direccionais ou de ângulo de emissão baixo, mas devido ao necessário posicionamento em linha com a face do objecto, pode ser de difícil instalação, especialmente em linhas de produção já existentes [32,36].

Dark Field Ring

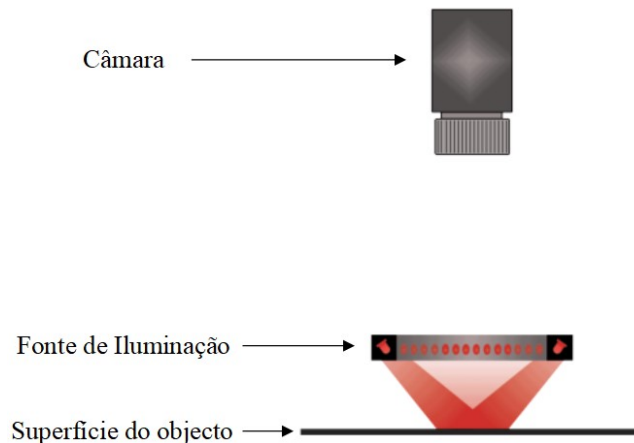


Figura 2.7: Esquema de iluminação utilizando um Dark Field Ring [32].

A aplicação mais comum, e com melhores resultados do *Dark Field*, pois é a que melhor faz sobressair os defeitos em peças com superfícies muito reflectoras. São colocadas uma ou duas filas de LEDs em anel, com ligeira inclinação para o centro, por vezes tapados de forma a garantir que a luz tem um ângulo baixo em relação à superfície, e assim não espalhar demasiada luz quer no objecto quer na câmara. Além das irregularidades, também é uma boa técnica para detectar

arestas. Tem o problema de não poder haver interferência de iluminação exterior e por isso pedir um ambiente fechado no seu funcionamento. Tem limitações de dimensão, por causa do tamanho da zona que o anel consegue iluminar e porque tem que estar muito perto do objecto para se conseguir o efeito desejado (o que pode não ser possível por causa da geometria deste). A fig. 2.7 apresenta um esquema desta técnica [32, 34, 36].

Iluminação Backlight

A Iluminação *Backlight*, tal como já foi descrito, permite criar silhuetas em contraste com um fundo brilhante. Esta técnica é utilizada em grande medida na metrologia por realçar as arestas e o tamanho dos furos, permitindo assim obter facilmente as medidas externas de uma peça ou rectificar o tamanho dos furos feitos. Utilizam-se diversas abordagens desta técnica: ao nível de comprimentos de onda e cores, no caso de se poder utilizar a transparência do objecto para detectar mais *features*; utilizando placas de luz difusa, para conseguir iluminar uniformemente as faces laterais e melhor evidenciar as arestas; fazendo a colimação da luz, tornando-a em raios paralelos e permitindo a melhor detecção de forma em peças redondas [21, 32, 34].

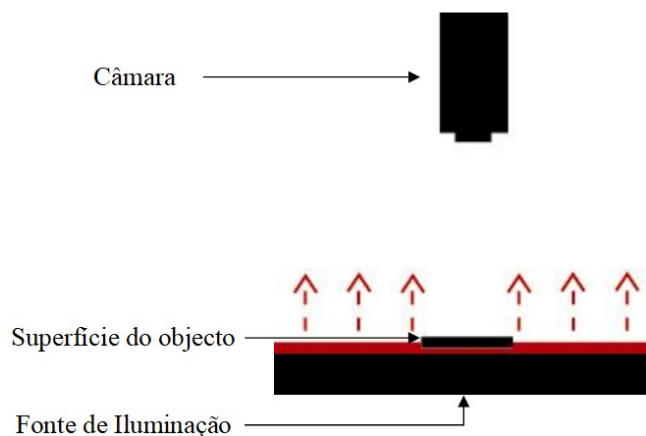


Figura 2.8: Esquema de uma iluminação *Backlight* [32].

2.6 Setups de sistemas de Visão Artificial

Aqui o objectivo é ver como são construídos os sistemas de VA disponíveis na literatura.

A vasta maioria dos sistemas construídos para o uso da Visão Artificial têm o intuito de serem integrados numa solução industrial. Por exemplo, nos casos de [19, 37] são utilizadas configurações iguais ou semelhantes àquelas usadas nas linhas de produção e no caso de [38] é montado mesmo na linha onde são produzidas as peças. Os sistemas que existem, criados para fazer testes, por vezes podem ser demasiado simples, utilizando apenas uma câmara e um filtro polarizador [39] ou com poucas alternativas de iluminação, como é o caso de [40] que utiliza apenas iluminação

directa, tendo a possibilidade de modificar o ângulo. No entanto, começa-se cada vez mais a contemplar o uso de diferentes técnicas de iluminação, nomeadamente o uso de uma técnica de cada um dos três grupos descritos [35,41].

A configuração mais comum é a disposição vertical do sistema, com a câmara no topo [5, 24, 40, 41], mas existem também exemplos de disposição na horizontal [35]. A montagem da iluminação no sistema tem a tendência a ser fixada à estrutura auxiliar que segura a câmara, ou à base onde está a peça no caso das disposições verticais [9, 24, 41], e nas horizontais criam-se estruturas adicionais que ficam pousadas [35]. Existe ainda o caso de [20], que é o caso específico da análise de um tubo e o sistema é projectado apenas para esse efeito, em que o tubo se move.

2.7 Conclusão

Neste capítulo foram então revistos alguns artigos com soluções do estado da arte desta área, bem como explicados os pontos teóricos em que o resto do trabalho assenta. Tanto para a parte do projecto do sistema, como para a parte experimental serão utilizados os conceitos que aqui foram descritos de maneira a conseguir melhor responder ao problema proposto inicialmente.

Capítulo 3

Desenvolvimento de um sistema electromecânico de inspecção por Visão Artificial

Neste capítulo é realizada uma das duas partes práticas do trabalho: o desenvolvimento do sistema electromecânico de inspecção por Visão Artificial, que daqui para a frente será denominado apenas de sistema de Visão Artificial. Neste capítulo, será feita a escolha dos componentes que integram o sistema final, o dimensionamento e a construção da estrutura mecânica, e a integração do sistema electrónico. Serão mostradas as considerações feitas, os cálculos efectuados e mostrado o resultado final tangível.

3.1 Definição do problema e requisitos

3.1.1 Processo de fabrico e inspecção na STA

Para se dar início ao trabalho, teve que ser entendido e enquadrado o problema no local onde surgiu: a fábrica da STA. Foram feitas ao todo três visitas, que permitiram conhecer, os processos de fabrico, os métodos utilizados pelo controlo de qualidade e conseguir amostras de puxadores que pudessem ser objecto de teste.

Os problemas com os defeitos surgem principalmente nas peças fabricadas por fundição. Visto que ainda é utilizado o método de fundição em coquilha, com vazamento manual, há uma maior probabilidade de surgirem peças defeituosas vindas desse processo. Para se ter uma noção, segundo dados da empresa, em 2017 a percentagem de peças rejeitadas vindas da fundição em coquilha foi de 23%, que significa que quase uma em cada quatro peças fabricadas foi rejeitada. Como há uma grande prevalência de defeitos, há uma grande atenção dada ao controlo de qualidade.

As peças normalmente seguem o seguinte processo: após a fundição, retiram-se os gitos existentes e a peça vai para a zona de lixagem, onde é rebarbada e lixada, para retirar as rebarbas.

Depois segue para a máquina de polimento, e passadas umas horas vai para o banho de anodização. Durante todo este processo, sempre que uma peça chega às mãos de um operador, este faz uma verificação visual da sua superfície. Quando chega à fase de inspecção propriamente dita, algumas peças foram já rejeitadas pelo caminho. Nesta fase, são já operadores treinados que fazem a verificação de 100% da produção, segundo os regulamentos de controlo de qualidade da fábrica. No Anexo A está uma cópia das instruções que estão presentes nas bancadas de inspecção. Neste documento estão as condições de referências nas quais deve ser feita a inspecção: num ambiente bem iluminado, fazer uma primeira análise a uma distância de 25-30 cm rejeitar todas as peças que tenham defeitos visíveis na superfície. Em caso de dúvida (no caso de um defeito ser pouco visível) fazer uma segunda inspecção à distância de 50-60 cm. No caso do defeito conseguir passar despercebido a esta distância, a peça é aceite, caso contrário é rejeitada. Estão neste documento também as faces da peça nas quais o critério tem que ser mais apertado, e em quais as faces esse critério é mais relaxado.

Uma tarefa de inspecção típica, consiste no operador colocar duas a três peças numa das mãos, com a face com o menor critério assente na palma. É então feita a inspecção da face da frente, de cima e de baixo das várias peças em simultâneo. As restantes faces são vistas à medida que as peças são retiradas da mão. Este processo tem a duração típica de 4 a 6 segundos, no caso das peças não terem defeitos; em caso de dúvida ou defeito, a duração aumenta para 6 a 10 segundos. Os menores defeitos que são rejeitados têm dimensões de 0.4 mm, abaixo disso a peça é normalmente aceite.

3.1.2 Amostras utilizadas

Para serem utilizadas neste trabalho foram cedidas peças de dois modelos diferentes, o 1907-211.2 e o 82000.2AG (desenhos nos Anexos B e C, respectivamente), representados na fig 3.1.

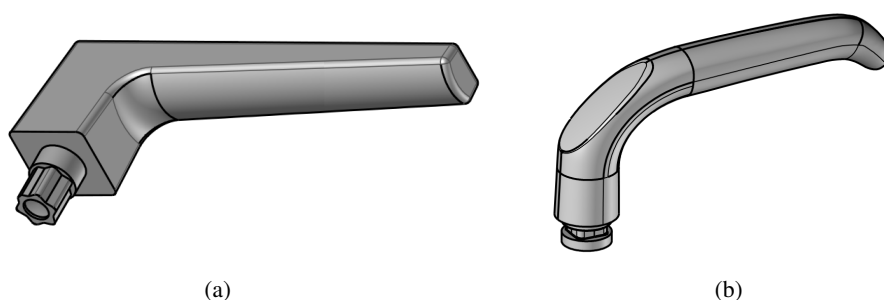


Figura 3.1: Modelos de puxadores disponíveis para teste: **a)** modelo 1907-211.2 (modelo escolhido); **b)** modelo 82000.2AG.

As diferenças geométricas são notáveis, com o 82000.2AG ser caracterizado pela face cilíndrica enquanto que o modelo 1907-211.2 tem as faces todas aproximadamente planas. Para efeitos desta dissertação, optou-se por apenas escolher um dos modelos. Tendo conhecimento prévio da dificuldade causada por faces redondas na Visão Artificial (a incidência de luz é mais difícil de

uniformizar, os defeitos parecem apenas conseguir ser detectados utilizando ângulos específicos de incidência) optou-se por escolher o modelo 1907-211.2. as suas faces planas e arestas bem definidas simplificam o processo de inspecção. De notar, que apesar de não terem sido utilizadas directamente no trabalho, houve uso dado às peças do modelo 82000.2AG, explicado mais à frente.

As amostras fornecidas foram cinco diferentes peças, cada uma com um dos defeitos típicos resultantes de falhas no processo de fabrico da peça. Cada amostra foi numerada de acordo com a lista abaixo e ao longo desta dissertação, cada peça será tratada apenas pelo número:

1. Riscos numa das faces
2. Poros na superfície
3. Linha de separação do molde
4. Pancadas em várias faces
5. Rechupes numa das faces

3.1.3 Outros Requisitos

Como já explicado anteriormente no capítulo 1, procurou-se construir uma estrutura tangível, que naturalmente necessitará de espaço. Sendo esta uma dissertação sugerida e financiada pelo INEGI, o trabalho foi realizado nas instalações desta instituição, mais precisamente na UTAF (no 1º piso do INEGI), onde foi disponibilizado espaço para que se pudesse montar a estrutura e realizar os testes pretendidos. Foi condição imposta pelo INEGI que o sistema construído pudesse cobrir não só o caso em estudo nesta dissertação, como possíveis casos futuros em que a Visão Artificial pudesse ser usada, nomeadamente para peças de pequena dimensão. Além disso, o sistema teria que estar preparado futuras tarefas resultantes desta dissertação.

Para a elaboração do trabalho, além do espaço cedido esteve também disponível um computador pessoal e portátil, que viria a influenciar algumas decisões em secções mais à frente. As características mais relevantes são:

Tabela 3.1: Características relevantes do computador utilizado nesta dissertação

Característica	Valor
Processador	Intel Core 2 Duo a 2,53 GHz
Memória RAM	6 Gb DDR3
Sistema Operativo	Windows 8.1
Versão USB	USB 2.0

3.2 Escolha da Câmara

O projecto de um sistema de VA começa-se pelos componentes que mais influência vão ter na qualidade da imagem obtida. Primeiro a câmara, de seguida a iluminação, e só depois a estrutura mecânica.

3.2.1 Projecto em que se insere e projectos futuros

Como projecto académico, espera-se que o preço seja uma das condições a ter mais em conta, e por isso se procure obter resultados com material que tenhas as condições mínimas necessárias. No entanto, e como explicado anteriormente no âmbito do problema, este projecto tem que ter em conta todos os trabalhos futuros que poderão surgir dele. Serve esta nota para explicar que vão ser calculados os requisitos mínimos necessários para o caso concreto deste trabalho, ainda que a câmara final escolhida possa ser um modelo com capacidades superiores. Além disto, a decisão final da compra de qualquer tipo de equipamento coube ao INEGI, entidade que financiou o material para esta dissertação. No caso de serem feitas considerações para trabalhos futuros, isso foi feito desde que não fosse prejudicada a aplicação concreta desta dissertação.

3.2.2 Características a considerar

A qualidade da imagem obtida é o que permite que a VA trabalhe de forma eficaz. Esta qualidade vai depender do tipo e número de câmaras, da sua posição e do sistema de Iluminação [2]. Nesta secção serão enumeradas as considerações que foram feitas tanto para o sensor como para a lente a ser utilizada na câmara.

Para começar, a escolha da câmara teve que ter em conta os seguintes factores:

- Projecto em que se insere e projectos futuros;
- Tecnologia a utilizar no sensor;
- Interface e comunicação da câmara;
- Drivers e Software (SDK) disponíveis;
- Distância de Trabalho (WD) e Campo de Visão (FOV);
- Resolução mínima do sensor;
- Iluminação a que vai estar sujeita;
- Focagem e Profundidade de Campo;
- Outras características da câmara (*Shutter, Cor, FPS, etc*).

3.2.3 Escolha do Sensor

3.2.3.1 Tecnologia do Sensor

Uma das tendências tecnológicas que ajudou no melhoramento da performance dos sistemas de VA industriais foram os avanços conseguidos nos sensores de imagem. As duas grandes tecnologias existentes hoje em dia são o CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) e o CCD (Charge-Coupled Device). A grande diferença entre as duas reside no método de transferência de informação, enquanto que nos sensores CCD isto é feito através de uma cadeia de transferência desde o primeiro pixel até ao último, os sensores CMOS possuem electrónica dedicada a cada pixel. As vantagens do CCD consistiam na elevada gama dinâmica e no alto contraste possível, no entanto, neste momento os próprios fabricantes de câmaras já não recomendam o uso desta tecnologia. Os avanços na tecnologia CMOS já conseguem igualar, e por vezes superar, estes resultados. Isto acrescentando ao facto destes sensores serem mais baratos de produzir, terem um consumo muito reduzido de energia, terem *frame rates* mais elevados e ser possível de haver um processamento ao nível do pixel [2, 6, 36, 42].

A escolha recai sobre a tecnologia CMOS pois o preço tem um grande peso neste projecto e a câmara espera-se que seja o componente mais caro do projecto. Além disso, numa procura inicial de possíveis fornecedores notou-se uma quase inexistência de câmaras CCD à venda, e desta maneira estar-se-ia a restringir outras características no sensor.

Outra distinção tecnológica que existe é entre câmaras Lineares e Matriciais (ou “câmaras de área”). As câmaras Lineares são aquelas que apenas capturam uma linha, e que necessitam que o objecto ou a câmara se movimentem para que se crie a imagem de duas dimensões. Esta tecnologia é utilizada maioritariamente em materiais fabricados continuamente (chapas metálicas, papel, etc) em que a linha obtida vai sendo comparada com as anteriormente capturadas; ou em objectos de formas cilíndricas para conseguir obter a planificação da face cilíndrica rodando a peça. As câmaras matriciais contêm sensores que permitem capturar imagens em 2D, semelhantes às câmaras convencionais do dia-a-dia, e permitem visualizar uma área no seu todo de uma só vez [2, 20, 43].

Tendo em conta o tipo de peças que se quer estudar, parece mais apropriado a utilização de uma câmara matricial, pois permite obter uma vista inteira de cada face da peça sem que esta tenha que ser movimentada. A geometria da peça escolhida, por ter várias faces planas perpendiculares entre si, também torna mais conveniente a utilização desta solução.

3.2.3.2 Interface e comunicação da câmara

Como este dispositivo será utilizado para fins de investigação e testes, quer-se que seja compatível com o maior número de dispositivos - nomeadamente computadores portáteis - onde é feita a captura e processamento da imagem. O protocolo de comunicação USB terá, por isso, uma vantagem em relação a todos os outros: existe uma porta USB em praticamente todos os computadores pessoais. Como não será necessária uma grande distância de transmissão de dados (principal desvantagem deste tipo de comunicação), procura-se então uma câmara que utilize o USB para

transmitir as imagens capturadas. Neste caso, como será utilizado um computador portátil que apenas utiliza o protocolo USB 2.0 (tal como mostrado na tabela 3.1), restrições adicionais terão que ter tidas em conta.

3.2.3.3 Drivers e Software disponíveis

A juntar à conexão a ser utilizada (USB), é necessário ter a preocupação do fabricante da câmara fornecer os *drivers* para o seu correcto funcionamento, neste caso para o *Windows*. Adicionalmente, procura-se que seja possível a programação da câmara personalizada em relação à aplicação. Como se pretende alterar parâmetros do sensor para efetuar diferentes tipos de testes, quer-se que o modelo de câmara escolhido seja programável, e preferencialmente numa linguagem utilizada amplamente (C++) ou de mais simples aprendizagem (Matlab ou Python).

3.2.3.4 Distância de Trabalho e Campo de Visão

Para estes dois elementos serão utilizados valores iniciais, que serão utilizados posteriormente para o cálculo da resolução. Após escolha da câmara e lente, estes requisitos serão recalculados para os seus valores efectivos. Os valores iniciais utilizados são aqueles que estão a ser utilizados actualmente no processo de inspecção manual, tendo em conta as directrizes dadas pela empresa, isto porque cabe a esta escolher de qual o tipo de critérios para considerar uma peça defeituosa (e o contrário); e também porque o sistema a construir servirá de termo de comparação com o método utilizado actualmente, por isso procurará ter as mesmas condições iniciais. Para a distância de trabalho (WD - *Working Distance*), segundo o Anexo A, que explica as condições em que a inspecção é feita nas fábricas, o ponto 5.2 refere que “A inspecção é feita a cerca de meio braço de distância dos olhos (25 – 30 cm)”. Por isso, o valor utilizado para a WD serão os 25 cm, ou 250 mm. No caso do campo de Visão (FOV - *Field of View*), utilizou-se uma fórmula simples, que soma a maior dimensão da maior peça a estudar com uma tolerância no posicionamento da peça e ainda uma distância entre o objecto e os limites da imagem, a dita “margem” [6]. O resultado disto será a dimensão mínima do FOV na direcção mais pequena, usualmente a vertical, por causa do formato de imagem mais comum dos sensores ser 4:3 - formato que será utilizado por causa do melhor rácio de dimensão vertical/horizontal na captura de imagens.

$$FOV_{\min} = \text{Dimensão máxima a captura} + \text{Tolerância no posionamento} + \text{Margem} \quad (3.1)$$

Segundo a peça a ser estudada e as suas dimensões, no Anexo B, a dimensão maior do puxador é a do seu comprimento da face frontal. Deste modo, a dimensão máxima a capturar será de 136 mm. Quanto à tolerância no posicionamento, o projecto mecânico prevê que a peça esteja fixa numa determinada posição, aquando da aquisição da imagem. Será explicado mais para a frente como isto é feito, mas para efeitos deste cálculo, considera-se que não é necessária esta tolerância, porque a posição do objecto não vai variar significativamente. Em relação à margem, como se pensa construir um sistema sem obstruções à captura de imagem da peça, e por esta vir

a estar fixa durante a captura de imagem, adiciona-se apenas 5 mm a cada lado como margem, para que não sejam confundidas as margens da imagem com as características da peça, durante o processamento. Feitas as contas, parte-se para o cálculo da resolução com um FOV de 146 mm.

3.2.3.5 Resolução mínima

Pegando no ponto de partida do FOV calculado no ponto anterior, utiliza-se a seguinte fórmula para ter um valor mínimo de Resolução, que relaciona o FOV com o tamanho do menor *feature* a ser detectado e com o número de píxeis necessários para o detectar [6]:

$$R_c = FOV \times \frac{N_f}{S_f} \quad (3.2)$$

Em que:

R_c - Medida da resolução no lado mais pequeno, em píxeis;

FOV - calculado anteriormente, é 146 mm;

N_f - número de píxeis necessários para que se consiga detectar uma certa *feature*, sendo que o *feature* mais pequeno que se quer detectar são os defeitos presentes nas peças. Partindo da tabela 3.2, e sabendo que serve apenas como estimativa, adopta-se um abordagem mais conservadora e utiliza-se o valor de 3 píxeis;

S_f - o tamanho do *feature* mais pequeno. Para este caso, irá ser utilizado um valor mostrado anteriormente, quando foi introduzido o problema. Na altura foi medida a dimensão mínima que um defeito tem, para a peça ser rejeitada, no valor de 0.4 mm.

Tabela 3.2: Número mínimo de píxeis consoante o tipo de *feature* a detectar [6].

Algoritmo	Precisão, em píxeis
Detecção de Arestas	1/3
Manchas	3
Correspondência de Padrões	1

Feitas as contas, o sensor escolhido terá que ter resolução mínima de 1095 píxeis, no lado mais pequeno. Sendo o formato de imagem a utilizar o 4:3, a matriz de píxeis mínima será então 1460x1095, ou 1.6 Megapíxeis. Admitindo que não haverá esta resolução de fábrica, utilizar-se-á o modelo com resolução superior existente.

3.2.3.6 Outras características do sensor

Existem outras características técnicas de uma câmara que se têm que ter em atenção, dependendo do projecto de VA em que esta vai ser inserida.

Cor ou Monocromática - No caso da VA, a utilização da cor serve normalmente para se fazer a classificação de objectos de cor diferente. Sendo altamente dependente da aplicação, no caso da inspecção de peças metálicas o que se procura é apenas o contraste produzido pelos defeitos, que

os permita identificar. No caso das câmaras monocromáticas, como não existem filtros de cor, há uma maior captura de detalhe. Portanto, no caso de não haver necessidade de distinguir as cores de um ou vários objectos, opta-se pelo sensor monocromático.

FPS (*Frames por segundo*) - Este valor indica o número de imagens que conseguem ser transmitidas por segundo da câmara para o computador, e é bastante dependente do protocolo utilizado na comunicação. Este valor quer-se alto apenas quando existe alguma movimentação do objecto. Como neste caso a peça irá estar fixa aquando da captura de imagem, este valor não necessita de ser elevado [2, 6].

Rolling Shutter vs Global Shutter - Esta característica refere-se à maneira como o sensor captura as imagens: ou toda de uma só vez (no caso do *Global Shutter*) ou de uma forma sequencial, linha-a-linha, de cima para baixo (*Rolling Shutter*). O *Global Shutter* tem a vantagem de capturar a imagem sem erros ou artefactos, quando existe movimento da câmara ou do objecto. Na ausência de movimento, como será o caso, as diferenças não são significativas, por será dada a preferência ao mais barato: *Rolling Shutter* [2].

Condições ambientais de trabalho - Para o propósito deste trabalho, a câmara estará montada numa sala climatizada dentro das instalações do INEGI, inclusive tapada de qualquer luz ambiente presente no local. Por isso não é necessário haver preocupações especiais na escolha do encapsulamento da câmara.

3.2.3.7 Modelo e características do Sensor obtido

Após estudo e cálculo das características necessárias, resta apenas falar na disponibilidade e no preço das câmaras existentes. Na projecção de qualquer sistema, estas são questões que enorme pertinência, pois restrições impostas por qualquer um destes motivos pode influenciar todo o restante trabalho. A questão do preço é sempre um assunto delicado, especialmente no contexto de uma dissertação, por isso teve-se sempre em conta o facto da câmara ser o componente mais caro do trabalho.

Foram contactados vários fornecedores de material de VA para Portugal, sendo que um deles, Infaimon, acordou em reunir-se no INEGI para não só discutir o material a comprar, como também oferecer alguns serviços que viriam a ser valiosos mais à frente no trabalho. Depois de conhecer as condições em que seria feita a Inspeção Automática, juntamente com os requisitos mínimos necessários, a câmara comprada foi o modelo UI-3270CP-M Rev. 2, com as características principais descritas na tabela 3.3. Fruto também de alguma negociação, o modelo comprado tem características bem acima das mínimas necessárias. O INEGI optou desta maneira tendo muito em conta futuros projectos, quer dentro do âmbito de projectos relacionados com este, quer noutras áreas da VA, devido às grandes capacidades da câmara e a versatilidade de usos que uma câmara pode ter.

Em relação ao sensor escolhido, a resolução passa a ser superior, o que permite absorver as aproximações feitas no cálculo inicial da resolução. Há ainda a inclusão de *Global Shutter* recomendada pelo vendedor, que em nada vai influenciar as características escolhidas, apenas vem adicionar mais funcionalidades. De notar também que a comunicação é feita por USB versão 3.0, mas compatível com USB 2.0 (protocolo utilizado pelo computador portátil disponível), fazendo

Tabela 3.3: Características do modelo de sensor escolhido [44].

Característica	Valor
Identificação do Item	UI-3270CP-M-GL Rev. 2: AB00961
Nome do modelo	UI-3270CP Rev. 2
Família	CP
Interface	Até USB 3.0 (compatível com USB 2.0)
Tipo de Sensor	CMOS
Fabricante do Sensor	Sony
Frame Rate máxima	57.0 FPS
Resolução (h x l)	2056 x 1542
Resolução	3,17 Mpix
Área óptica	7,093 mm x 5,320 mm
Classe óptica	1/1.8"
<i>Shutter</i>	<i>Global Shutter</i>
Tamanho de píxel	3,45 μm
Código IP	IP30

apenas diminuir o numero máximo de FPS, o que não tem influência no trabalho. Características adicionais estão presentes no *datasheet* presente no Anexo D.

3.2.4 Escolha da Lente

A escolha da lente a utilizar (também chamada de óptica) é feita conjuntamente com o sensor, mas que depende das características deste para ser escolhida. Começando logo pela parte mecânica, o tipo de sistema de fixação terá que ser o mesmo - neste caso, o sensor tem um encaixe *standard C-Mount*. De seguida, escolher as especificações que definem uma óptica: *F-number*, Distância Focal e o tamanho relativo ao sensor da câmara [2, 45].

3.2.4.1 *F-number*

O *F-number*, nome que também pode ser dado à abertura da íris, representa o factor de divisão do diâmetro máximo da óptica. É escrito como um rácio entre o diâmetro de abertura da lente e o diâmetro interno na óptica, e além de afectar a quantidade de luz que entra no sensor, também afecta a profundidade de campo. Valores mais baixos (perto de 1) permitem deixar passar mais luz, e obter imagens geralmente mais claras em comparação, mas valores altos permitem uma maior profundidade máxima que o objecto se consegue manter focado, fazendo aparecer mais pormenores, especialmente se as peças estiverem em algum tipo de perspectiva. O ajuste do *F-number* é normalmente feito através da abertura ou fecho de uma íris presente na óptica [34, 45]. Para o caso deste trabalho, as peças a estudar são metálicas anodizadas, o que as torna bastante reflectivas da luz e portanto pode haver o caso das imagens ficarem demasiado claras (com pouco contraste), se a abertura da íris for demasiado grande. O ideal será ter uma íris ajustável na lente,



Figura 3.2: Fotografia do modelo da câmara escolhido, que inclui o sensor e o encapsulamento [44].

para permitir testar as várias aberturas. Ainda que o problema do contraste poderá ser resolvido com a iluminação, ter este ajuste da íris pode trazer controle adicional.

3.2.4.2 Distância focal (f)

Esta distância, que muitas vezes utiliza a notação de f , pode ser definida pela distância entre o centro óptico da lente e a superfície onde é projectada a imagem. É possível de ser definida também como uma relação entre a WD e o FOV , podendo ser formulada de várias maneiras, mas será utilizado aqui uma formulação semelhante à feita em [45], por ser a literatura mais recente encontrada, e vinda directamente do fabricante. Em vez de serem utilizadas as medidas na horizontal, serão utilizadas as medidas verticais, por terem sido essas as calculadas anteriormente. Tem-se então:

$$f = s \times \frac{WD}{FOV} \quad (3.3)$$

Em que:

f - distância focal, a ser calculada;

s - dimensão vertical do sensor escolhido: 5,320mm, segundo o *datasheet* no Anexo D;

WD - distância de trabalho escolhida anteriormente para o sensor: 250 mm;

FOV - campo de visão vertical, calculado anteriormente: 146 mm.

Aplicando esta fórmula aproximada, obtém-se o primeiro valor de $f = 9.11$ mm. Como não é um valor normalizado, procura-se o valor imediatamente abaixo porque, para uma mesma WD (característica do sistema que não se quer variar), uma f mais baixa permite obter um maior FOV .

Portanto, escolhe-se o valor de $f = 8$ e calcula-se o novo FOV invertendo a fórmula acima:

$$FOV = s \times \frac{WD}{f} \quad (3.4)$$

Sabendo as dimensões do sensor, segundo o *datasheet* do Anexo D (7,093 x 5,320 mm), aplica-se a fórmula para as duas dimensões do FOV utilizando a mesma WD, e obtém-se os valores aproximados:

$$FOV_h = 221,66 \text{ mm}$$

$$FOV_v = 166,25 \text{ mm}$$

Os valores são satisfatórios, pois permitem obter a imagem do objecto completa dentro da WD pretendida, com alguma margem extra para os limites da imagem. Será então utilizado o valor de $f = 8$ mm na lente. No entanto, estes valores de FOV são apenas aproximações, podendo ser comparadas com a calculadora existente no site do fabricante da câmara, que dando um certo valor de WD e de f , obtém-se os valores do FOV do fabricante, tal como mostra a fig. 3.3 [45].

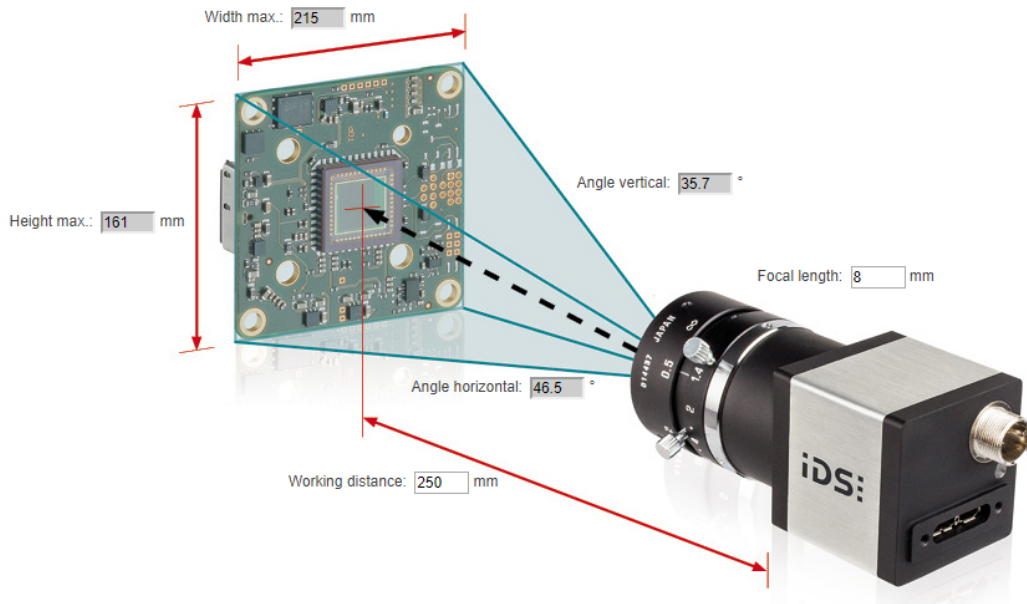


Figura 3.3: Cálculo dos valores para o FOV, utilizando a ferramenta do fabricante do sensor [46].

3.2.4.3 Tamanho relativo ao sensor da câmara

Por fim, as ópticas utilizam uma notação de tamanho semelhante à dos sensores, que se refere ao tamanho da diagonal (no caso dos sensores) medida em polegadas. Esta medida nas lentes serve para se certificar que o tamanho da imagem produzida nela é igual ou superior à do sensor, de maneira a não acontecerem aberrações ópticas como o *Vignetting* - se a imagem da lente for de tamanho inferior à do sensor, esta aparece com os cantos escuros, provocando contraste indesejado.

No caso do sensor escolhido, este tem o tamanho de 1/1,8"(8,87 mm de diagonal), pelo que é compatível com lentes de tamanho nominal igual, ou outros tamanhos superiores, tais como 1/2"ou 2/3".

3.2.4.4 Selecção do modelo da lente

Tendo em conta as características vistas anteriormente, foi comunicado ao fornecedor a intenção de se obter uma lente com distância focal de 8mm, íris ajustável e compatível com o sensor previamente escolhido. Segundo o vendedor, é recomendado o uso de distâncias focais acima dos 6mm, para não causar distorções na imagem. A sugestão e modelo comprado foi uma óptica 2/3", com íris com ajuste manual de 1.4 até 16, com as principais características na tabela 3.4

Tabela 3.4: Características principais do modelo da lente escolhido.

Característica	Valor
Distância Focal	8 mm
Máxima abertura	F = 1:1.4
Tamanho máximo de sensor	2/3"
Distorção	0.3%
Distância mínima de foco	0.1 m
Montagem	C-Mount
Ajuste de Íris	Manual
Ajust de Foco	Manual



Figura 3.4: Fotografia do modelo de lente escolhido

3.3 Iluminação do sistema de Visão Artificial

3.3.1 Escolha de um sistema de iluminação

Com o objectivo de conseguir o contraste ideal, precisa-se de ter a iluminação indicada para a aplicação. O infinito tipo de peças, juntamente com a multitude de condições em que vai é feita a sua inspecção, fazem com que ainda não existam soluções ditas “chave na mão” para sistemas de iluminação, para cada problema tem que ser estudada uma solução partindo inicialmente de casos conhecidos semelhantes e técnicas possíveis de serem aplicadas, mas o processo passa sempre por serem feitos testes no local. A Iluminação óptima pode ser subjectiva e varia dependendo não só dos elementos que constituem a cena que é fotografada, mas também do processamento que é feito posteriormente, por isso requer intervenção manual para melhor avaliar qual a configuração ideal de luz [3, 21]. Foram feitos vários esforços para catalogar os métodos de iluminação, numa tentativa de criar uma base de dados de técnicas a utilizar, sendo no casos de geometria mais simples possível aplicar algumas das “receitas” neles presentes [47, 48]. Além disso, têm sido feitos estudos numa tentativa de quantificar a eficácia de alguns métodos de iluminação, para casos específicos [35, 49] ou até tentativas de criar iluminação adaptável [50] e algoritmos de simulação para obter uma configuração ideal de iluminação [18, 19, 40].

Neste momento, o método utilizado na indústria para escolher a iluminação para um sistema de VA segue uma sequência [2, 6, 34]:

- Em primeiro lugar, saber quais as limitações físicas que o sistema vai ter. Qual o espaço que existe para todos os elementos, se o sistema é para ser montado numa linha automatizada já existente ou se terá uma estrutura à parte e quais as condições ambientais em que o trabalho de inspecção será feito.
- Segundo, conhecer o cenário em que é feita a inspecção. Peças fixas ou em movimento, qual a velocidade no caso de haver movimento, orientação dos objectos.
- Terceiro, estudar a peça a iluminar. Qual o tipo de material, problemas com reflectividade e/ou transparência, faces a inspeccionar, textura e geometria no geral.
- Quarto, caracterizar os elementos que se querem evidenciar. Se são defeitos ou *features* que se procuram, como é que esses elementos se destacam do resto da geometria.
- Quinto, escolher as técnicas mais adequadas. Utilizando casos homólogos ao que se apresenta e sabendo os efeitos das técnicas de iluminação utilizadas, eleger aquelas que à partida terão melhores resultados.
- Por último, a fase de testes. Independentemente do nível de análise, nada substitui o processo de testar com alguns *setups* de iluminação,

Esta metodologia é altamente experimental. Mesmo com todas as considerações feitas previamente à fase de testes, esta última é a que vai de facto decidir a configuração final de iluminação.

A facilidade que existe hoje em projectar um sistema de iluminação deve-se muito à existência dos casos previamente estudados e experimentados. No caso das superfícies metálicas (no qual o Alumínio, objecto de estudo deste trabalho, se insere), a principal característica a ter em atenção é a sua reflectividade, especialmente em peças com tratamentos de anodização [51]. É comum utilizar filtros polarizadores ou iluminação difusa para evitar que apareçam manchas de brilho intenso, um dos problemas mais comuns quando se tenta iluminar este tipo de superfícies [5, 39, 40, 52]. No entanto, a utilização de luz visível sem elementos ópticos é possível, nomeadamente recorrendo a técnicas de iluminação Dark Field, capazes também de evitar esse brilho indesejado [35]. Os defeitos típicos em peças de fundição de alumínio causam, na sua maioria, alterações topográficas na superfície do objecto em que ocorrem [5, 11, 24], por isso as técnicas à partida mais indicadas são aquelas que conseguem aumentar o contraste causado por estas alterações.

3.3.2 Projecto do sistema de iluminação

Para construir um sistema de iluminação, seguem-se os pontos que foram descritos em 3.3.1 como guia para iniciar o projecto: As limitações físicas do projecto são poucas. Visto que todo o sistema será pensado de raiz, tem apenas que se ter em conta os requisitos iniciais: a distância entre a câmara e as peças (WD), e a dimensão dos puxadores. Como o objectivo é produzir uma máquina para testes, estes requisitos vão influenciar a estrutura que será pensada, de maneira a que todas as faces da peça consigam ser iluminadas utilizando as várias técnicas disponíveis, sem que haja impedimentos mecânicos e mantendo-se à distância da câmara (WD) pretendida.

Quanto às condições da inspecção, pensa-se desde já em criar um sistema tapado (com a possibilidade de ser aberto) para controlar as interferências de iluminação possíveis. Além disso, pensa-se também em fixar as peças para a captura de imagem. Como os puxadores possuem várias faces que requerem inspecção, a abordagem considerada foi a de um sistema que mostre uma face da peça de cada vez, para assim se conseguir estudar qual o método de iluminação a utilizar consoante o defeito e a face.

O material já se sabe, é o Alumínio. E nos casos dos puxadores a utilizar as peças são anodizadas, o que lhes confere reflectividade adicional. Já se sabe poderá haver problemas de brilho nas imagens, mas dependendo das técnicas utilizadas esse efeito pode ser mitigado. As faces são planas e com arestas bem definidas (um dos motivos pelos quais foi este o modelo escolhido, como referido inicialmente), o que ajuda na abordagem face-a-face descrita no ponto anterior e facilita no uso de alguns dispositivos de iluminação, que costumam estar preparados para o uso em superfícies planas.

Em relação aos elementos que se querem evidenciar, o objectivo deste trabalho é encontrar os defeitos existentes nas peças. Ainda que a VA permita acrescentar outras funções, o foco aqui será apenas a detecção das imperfeições que as peças tenham, de maneira a serem rejeitadas. No caso específico do modelo em estudo, o acompanhamento de sessões de controle de qualidade encontrou 5 tipos de defeitos: riscos, poros, existência de linha de separação do molde, pancadas e rechupes.

Todos os defeitos alteram a topografia da face em que estão inseridos. No caso dos riscos, nota-se que se formam linhas com alguma profundidade na superfície. No caso dos poros e rechupes, são círculos de diâmetros variados com alguma profundidade na superfície. No caso das pancadas, criam-se pequenas zonas de baixa profundidade (mais largas em comparação com os riscos) perto das arestas da peça. Quando aparece uma linha de separação, que ocorre nas faces laterais da peça, faz com que seja alterada a forma da face e aparecendo uma “aresta” adicional na peça. Segundo as indicações dadas para o controle de qualidade (Anexo A), o critério de selecção das peças que contenham qualquer um destes defeitos é: caso o defeito seja visível, a peça é rejeitada.

Conhecendo então os defeitos e os seus efeitos nas faces da peça, pode-se então pensar nas técnicas de iluminação que facilitem na criação de contraste, e possivelmente detecte os defeitos. Para cada tipo diferente de defeito, foram escolhidas as técnicas e mostradas na tabela 2, com base nos conhecimentos adquiridos anteriormente e comparação com casos semelhantes presentes em [2, 31, 32, 36, 53]. Os recursos da literatura permitem ter uma ideia de como cada técnica é utilizada, em especial em [53] que possui exemplos práticos.

Tabela 3.5: Métodos de Iluminação a utilizar nos diferentes defeitos

Defeito	Técnicas de iluminação	Justificação
1 - Riscos	Iluminação em Domo, <i>Dark Field Ring</i>	A utilização de iluminação difusa permite neutralizar o brilho da peça e a profundidade dos riscos pode causar suficiente contraste para estes serem detectados, enquanto que uso de técnicas de <i>Dark Field</i> permite eliminar o brilho e evidenciar os riscos como linhas brancas na superfície escura
2 - Poros	Iluminação em Domo, <i>Dark Field Ring</i>	Os poros causam a mesma alteração topográfica que os riscos, mas por serem circulares podem ser mais fáceis de detectar, especialmente utilizando a técnica de Domo
3 - Linha de Separação	Iluminação Directa, Domo, <i>Dark Field Ring</i>	Neste caso, porque a forma da face é alterada, pode-se abordar de duas maneiras: Ou se ilumina a face em questão para se notar a alteração de geometria (Iluminação Directa, se for possível, senão utilizar a difusão do Domo para uniformemente iluminar a face), ou se ilumina de maneira a procurar as arestas (<i>Dark Field Ring</i>) para encontrar a “aresta” errada.
4 - Pancadas	Iluminação em Domo, <i>Dark Field Ring</i> , Tangencial	Aqui a escolha torna-se menos óbvia, e mais dependente de testes. Como os defeitos têm uma textura semelhante ao do resto da peça, e ficando muito perto das arestas da face, a escolha aqui vai para tentar utilizar uma estratégia semelhante à dos outros defeitos que causam alterações à superfície da peça.
5 - Rechupes	Iluminação em Domo, <i>Dark Field Ring</i>	Os rechupes causam a mesma alteração topográfica que os riscos e poros, por isso usam-se técnicas similares.

Aqui o objectivo é apenas ter um ponto de partida, já que serão feitos testes não só às técnicas escolhidas como também a outras que existam, para assim ser considerado o maior número de casos e ser melhor estudada a solução de iluminação final.

3.3.3 Teste de técnicas de iluminação

Fazendo um primeiro estudo de como iluminar a peça, passa-se à prática, começando a testar *setups* possíveis. Como a escolha da iluminação vai influenciar a maneira como o resto do sistema vai ser construído, estes testes foram feitos antes de se começar a fase do projecto mecânico.

3.3.3.1 Condições iniciais e configuração

Tendo já na posse as peças defeituosas a estudar, foi criado um *setup* “caseiro” simples, de maneira a poder-se testar não só as técnicas de iluminação, como também o funcionamento da câmara. Foi utilizada uma caixa de cartão fechada, onde dentro estaria a peça, e com um furo de diâmetro suficiente para encaixe da câmara, numa montagem igual à da fig. 3.5. Na parte traseira da caixa foi colocado folhas de papel escuro, para diminuir os efeitos da luz reflectida pelo cartão. Como fonte de luz, foi utilizada uma fita de LEDs *neopixel* existente no INEGI (*datasheet* disponível em [54]) que, além de ter intensidade luminosa mais do que suficiente para o efeito, era feita num material facilmente manuseável, que permitiu que fosse colada em diferentes posições dentro da caixa, de maneira a simular as diferentes técnicas de iluminação. Para efeito deste teste inicial, a distância utilizada entre a câmara e o objecto não foi a distância de trabalho (WD) designada inicialmente para o projecto, pois além da simplicidade do *setup* não o permitir, neste teste apenas se procura alguma validação, ainda que qualitativa, das considerações e escolhas feitas anteriormente em questões de iluminação e de câmara.

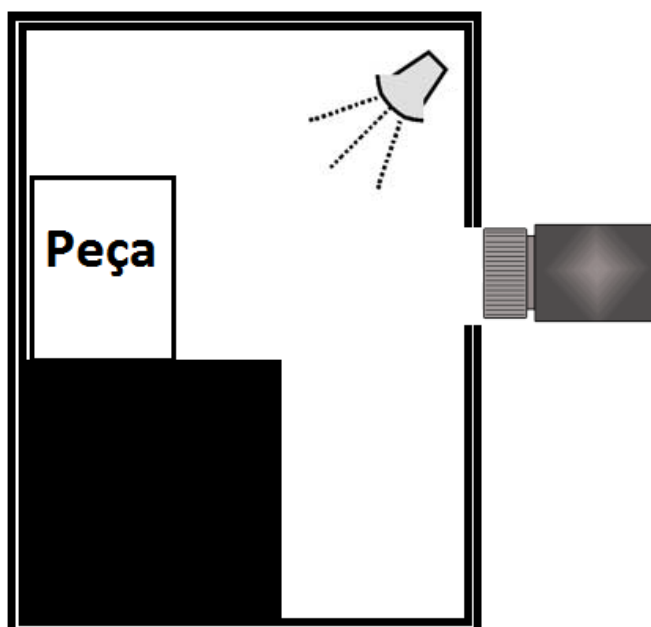


Figura 3.5: *Setup* utilizado no teste inicial, representando neste caso a utilização da técnica de iluminação directa.

A fita de LEDs utilizada como fonte de iluminação é uma fita programável, que tem 4 LEDs de cor diferente: vermelho, azul, verde e branco, e 3 cabos de ligação: pólo positivo (+5 Volts),

pólo negativo (ligação à terra) e o cabo dito de “programação”. Esta fita foi controlada utilizando uma placa *Arduino* UNO, e alimentada através de um circuito simples: 5V vindos de uma fonte de alimentação ligam à alimentação do *Arduino* e ao contacto positivo da fita de LEDs, enquanto que o polo negativo da fita e a massa do *Arduino* estavam ambos ligados à massa da fonte. Adicionalmente, o cabo de programação da fita estava conectado ao pino 8 do *Arduino*, e ao pino 6 estava conectado um botão em *pull-up*, com uma resistência de 10k Ω . O programa feito, disponível no Anexo H, utiliza a *library* disponibilizada pelo fabricante da fita de LEDs, e consiste numa máquina de estados em que cada estado equivale a uma cor diferente. Após fazer uma pequena rotina de diagnóstico quando é ligada a energia, o botão permite alterar entre 5 estados (cores) diferentes pela seguinte ordem: fita apagada, vermelha, verde, azul, branco 1(apenas LED branco aceso) e branco 2 (todos os LEDs acesos).

Este teste foi também, tal como referido, uma oportunidade para testar a operação da câmara. Visto que a óptica tem ajuste manual de abertura da íris, foram testadas as diferentes aberturas, com os resultados discutidos à frente. A programação da câmara foi feita utilizando a linguagem *Python*, utilizando as ferramentas fornecidas pelo fabricante que permitem a implementação em *Python* das funções da API da câmara. Não se vai entrar em detalhes da programação neste ponto, isso será feito mais à frente na secção da construção e montagem do sistema, onde o programa será explicado em detalhe. Apenas de referir que, nesta fase, foi apenas criada uma rotina simples para a captura de imagens na maior resolução possível pelo sensor e guardadas no computador. A alimentação eléctrica, bem como a comunicação da câmara foi feita através do cabo USB fornecido.

As técnicas que aqui foram implementadas estão dependentes do material disponível, com recurso a material simples, como é o caso do cartão ou do papel de alumínio. Além da técnica referida na fig. 3.5 (Iluminação Directa), foi feito:

- Uma tentativa de iluminação tangencial, colocando os LEDs numa fita vertical e utilizando pedaços de cartão para limitar a quantidade de luz (fig. 3.5);
- Uma técnica de iluminação indirecta semi-difusa, colocando os LEDs virados para a parede oposta à peça, fazendo com que a luz fosse reflectida numa folha de papel de alumínio um pouco amachucada para conseguir espalhar a luz, e protegendo a peça de luz directa que pudesse vir dos LEDs (fig. 3.6 a))
- Uma emulação de um domo, dispondo a fita de LEDs em anel e virando-a para o papel de alumínio, dispondo-os perto deste (fig. 3.6 b))
- Um anel de técnica de dark field, dispondo a fita de LEDs em anel mas virando-a para a peça, limitando o ângulo de incidência fisicamente (fig. 3.6 c))

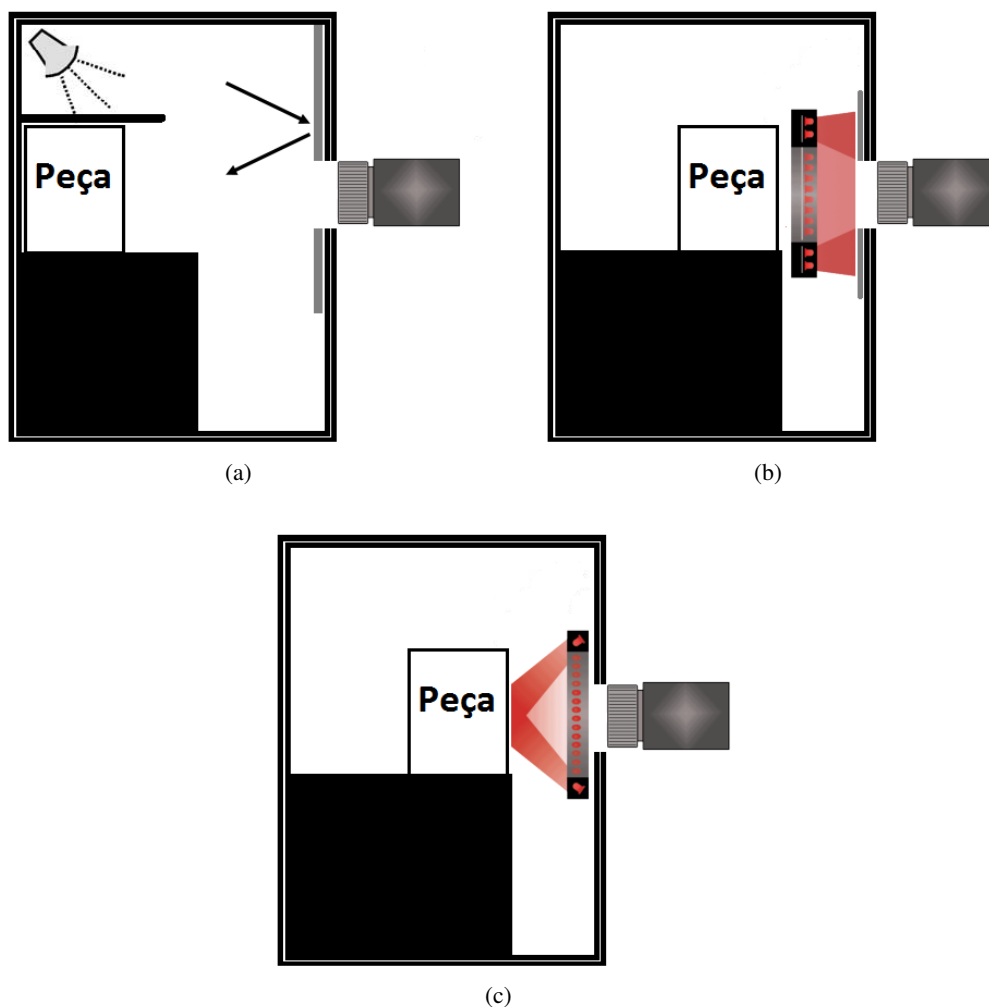
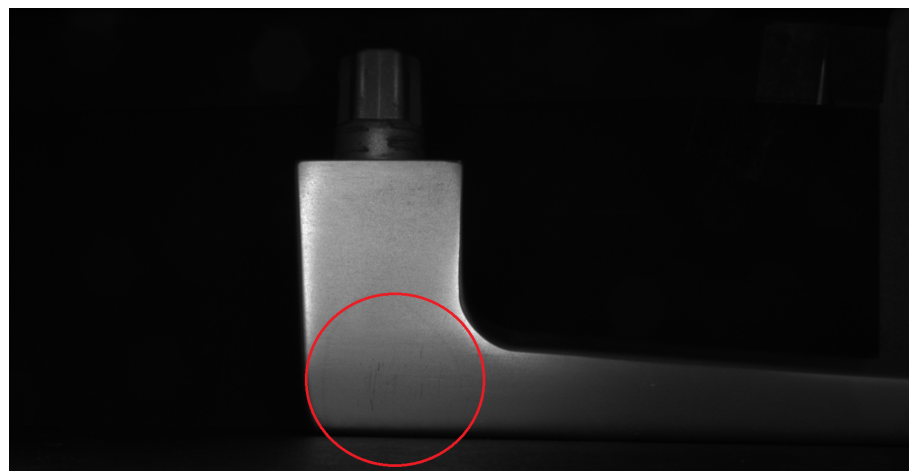


Figura 3.6: Esquema das iluminações utilizadas (A camada cinzenta do lado direito da caixa representa o papel de alumínio utilizado): **a)** indirecta semi-difusa utilizada; **b)** em anel, simulando o efeito de um Domo; **c)** em anel, utilizando o efeito de *Dark Field*.

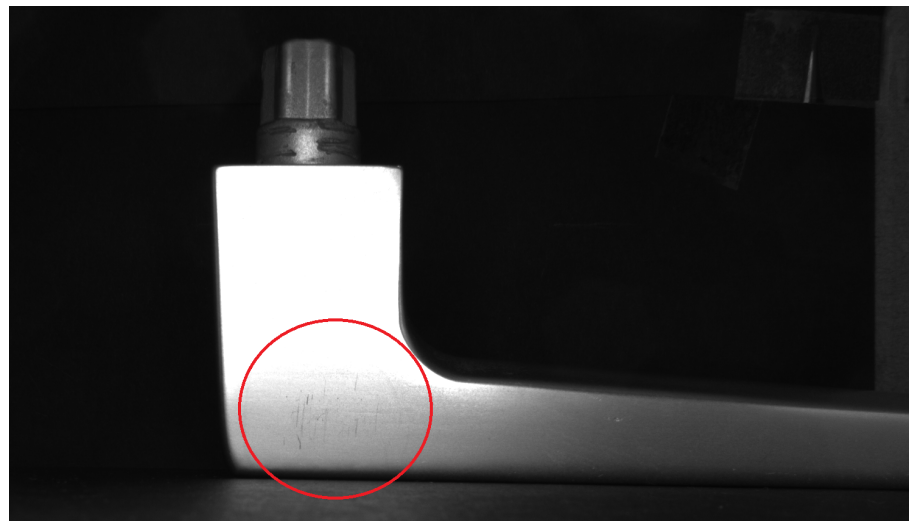
3.3.3.2 Resultados e Discussão

Como a avaliação dos resultados deste teste é qualitativa, a classificação feita foi a de ter a percepção de se ter conseguido um bom contraste ou não; por exemplo se os defeitos ficam escuros numa face clara, ou brancos numa face escura. Foram sendo feitas várias tentativas e ajustes tanto à iluminação como ao posicionamento da peça, para conseguir os resultados obtidos.

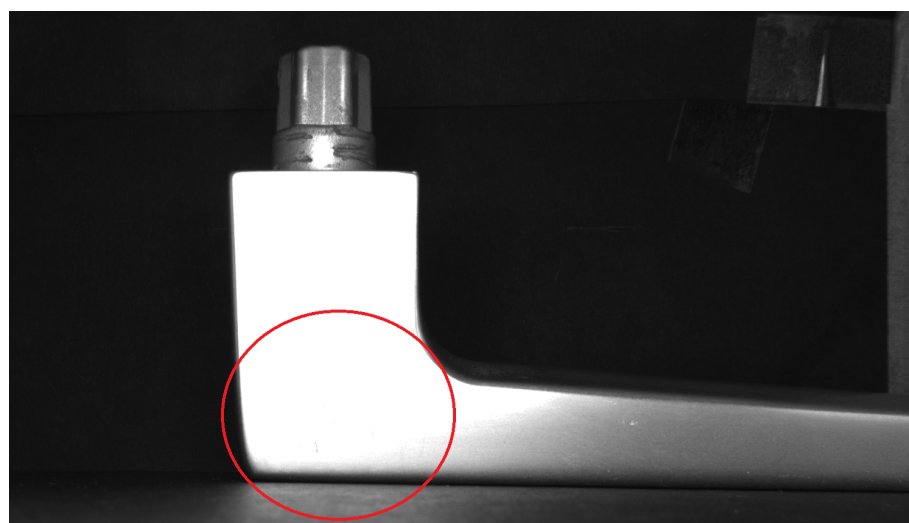
Em primeiro lugar, a variação da íris veio mostrar que, sendo as peças mesmo muito reflectivas da luz, a íris terá que ficar numa das posições mais fechadas ($F=16$ ou $F=12$) para obtenção de melhores imagens. Tal como mostrado na fig. 3.7, para valores abaixo de $F=12$ a quantidade de luz é tal que a imagem fica saturada. Para o caso de ser preciso uma menor absorção de luz para além do fecho máximo da íris, terá que ser controlado tempo de exposição na parte do software da câmara.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.7: Resultados da utilização das diferentes aberturas da íris: **a)** $F=12$; **b)** $F=8$; **c)** $F=6$

As peças foram numeradas de 1 a 5, como referido anteriormente, cada uma com o seu defeito característico. Quanto aos defeitos em si, foram conseguidas algumas imagens interessantes. De notar que a técnica de *Dark Field* foi pouco utilizada principalmente pelas dificuldades construtivas que um sistema desta simplicidade tem. O facto do anel ser feito em cartão, e a posição que a peça tem que ter para que o efeito se verifique fazem com que a maioria das imagens obtidas não sejam de qualidade suficiente para se chegar a grandes conclusões (demasiado desfocadas). Utilizou-se com sucesso apenas na peça 1 como prova que o conceito à partida funcionará, ficando-se assim com pretensões de fabricar uma solução construtiva melhor para esta técnica.

Peça 1 Tal como é verificável na fig. 3.8, foram utilizadas com sucesso as técnicas de Iluminação Indirecta Semi-Difusa e *Dark Field Ring*. No caso da primeira, nota-se um bom contraste criado entre os riscos (a escuro, assinalados) e o resto da face; na segunda, ainda que um pouco desfocada, consegue-se perceber que o efeito de *Dark Field* funciona, realçando os riscos (a branco, assinalados) numa face escura. Vistos os resultados, acredita-se que estas duas técnicas têm grandes possibilidades de funcionar no sistema final.



Figura 3.8: Resultados para a peça 1: **a)** utilizando a técnica de iluminação indirecta semi-difusa; **b)** aplicando a técnica de *Dark Field*.

Peça 2 Nesta peça, como os defeitos são bem notórios, especialmente na face da frente, e foi até possível utilizar iluminação directa para conseguir bom contraste. No entanto, utilizando esta técnica na face lateral faz com que a imagem fique saturada. Por isso, a técnica que se obteve melhores resultados, e que se pensa ser a mais indicada, é a que simula um Domo. Vendo a comparação na fig. 3.9, conseguem-se ver os efeitos de algum equilíbrio na luz que alcança a face da peça, permitindo ver os defeitos sem brilhos adicionais.

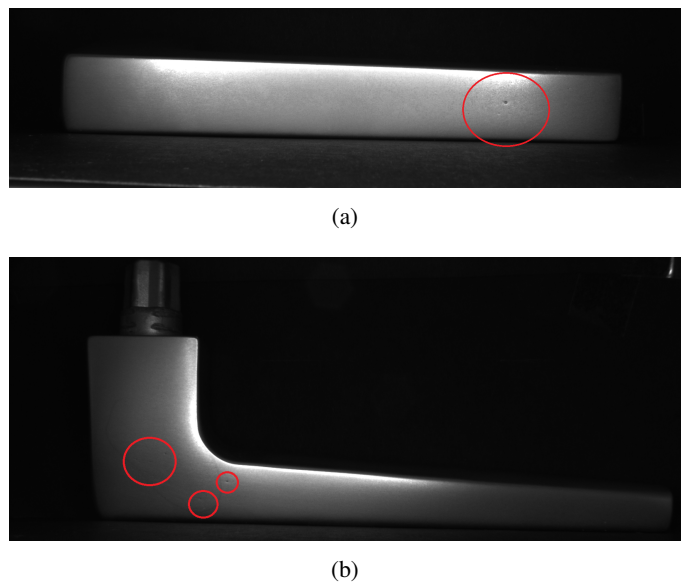


Figura 3.9: Resultados das duas faces da peça 2: **a)** face frontal, utilizando a iluminação directa; **b)** face lateral, utilizando a iluminação indirecta.

Peça 3 Os melhores resultados vieram das técnicas de Iluminação Directa e da técnica tipo-Domo. Ambas se nota a presença da aresta “extra” (fig. 3.10), com a ligeira diferença do menor brilho existente na imagem utilizando a iluminação com efeito de Domo; por isso confia-se que esta técnica conseguirá obter bons resultados na detecção deste defeito.

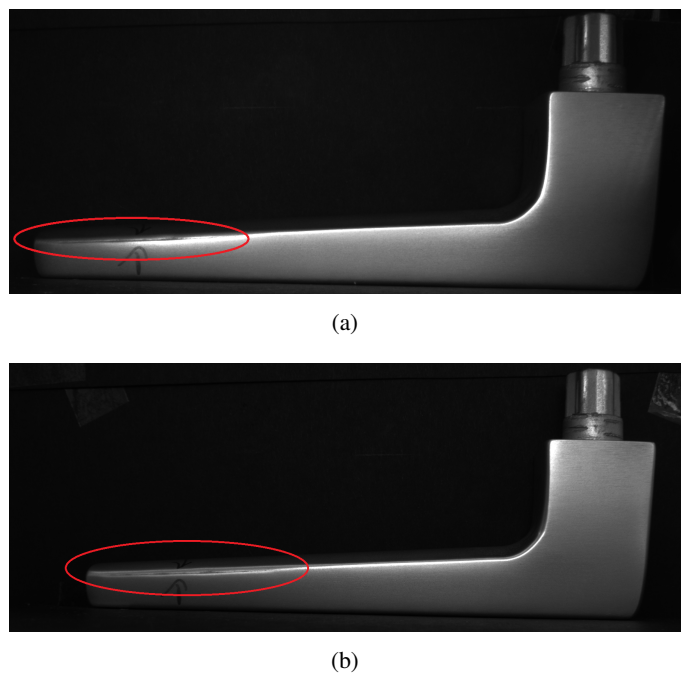


Figura 3.10: Comparação de utilização das duas melhores técnicas para a peça 3: **a)** iluminação directa; **b)** iluminação indirecta, tipo Domo.

Peça 4 Esta é a peça de mais difícil análise, não só pela variedade de defeitos presentes, como a sua posição na geometria da peça. Os defeitos nas arestas da face frontal, conseguem ser detetados pelas diferentes técnicas de iluminação Indirecta, mas a principal dificuldade pensa-se que será a detecção das pancadas na face de cima, pois mesmo nos melhores resultados o contraste conseguido é pouco (fig. 3.11). Pensa-se que a utilização da iluminação em Domo será um caminho possível a seguir, mas talvez sejam precisos métodos e especialmente perspectivas das faces diferentes.

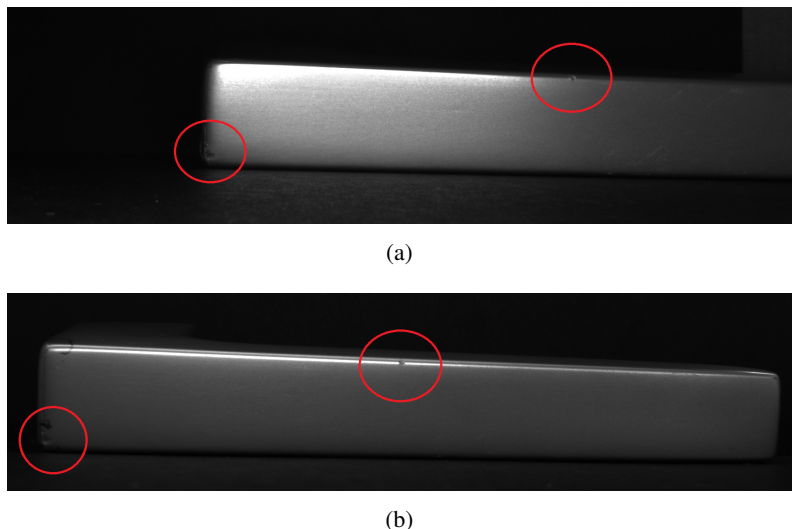


Figura 3.11: Resultados para a peça 4: **a)** utilizando a técnica tipo Domo; **b)** utilizando a iluminação indirecta.

Peça 5 No caso da peça 5, o efeito na superfície da peça (e consequente resultado da iluminação) é bastante semelhante ao da peça 2. O que muda é o tamanho do defeito, que é menor neste caso, e a concentração de defeitos. Pensa-se portanto que as técnicas a utilizar na peça 2 sejam as indicadas para esta peça também.

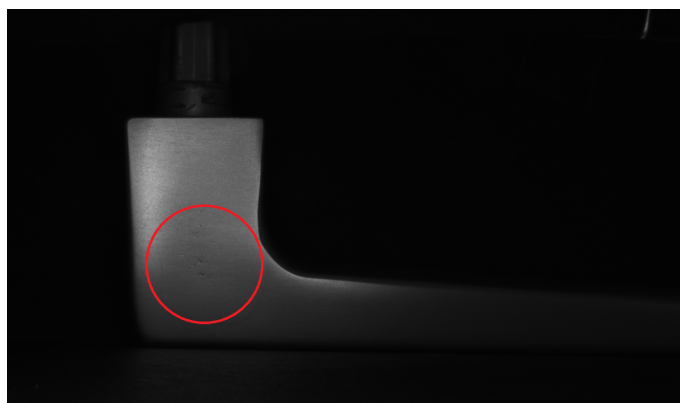


Figura 3.12: Resultados para a peça 5, utilizando a técnica tipo Domo

3.3.3.3 Conclusões do teste

Muitos dos testes vieram de alguma forma confirmar as técnicas previstas. A técnica que consegue cobrir o maior número de casos parece ser o Domo, devido à capacidade difusora e controle do brilho das peças. Ainda assim, o facto de se ter conseguido utilizar a técnica de *Dark Field*, faz com que seja de grande importância a construção de uma solução para que esta técnica possa ser aplicada em todos os outros casos, já que, tal como o Domo, é uma das soluções previstas que mais casos, à partida, conseguirá detectar.

Este estudo serve vários propósitos. Numa primeira instância tem a importância de familiarizar com o funcionamento dos componentes de um sistema de VA (sensor da câmara, lentes e luzes) e com métodos de captura de imagem. Depois, permite criar requisitos na construção do sistema mecânico, como é o caso da posição das peças para serem fotografadas, das soluções de iluminação que têm que ser encaixadas na estrutura.

3.3.3.4 Teste extra feito por parceiros

No início do trabalho foi falado que havia dois modelos disponíveis para recolha de amostras: o modelo 1907-211.2 e o modelo 82000.2AG (desenhos nos Anexos B e C). Por motivos explicados anteriormente, foi escolhido o primeiro modelo para servir de objecto de estudo; no entanto, foi dado uso ao segundo modelo. Durante uma das reuniões com o fornecedor da câmara foi oferecida da parte deles, a possibilidade de ser feito um pequeno estudo de técnicas de iluminação. O que foi proposto pela Infaimon foi, utilizando amostras fornecidas pelo INEGI, utilizar o material disponível nas instalações deles para depois dar sugestões de técnicas de iluminação a utilizar. Foram então cedidas as amostras do modelo 82000.2AG para que fosse feito o estudo proposto. Mesmo tendo geometria diferente, o problema da alta reflectividade da superfície acontece nos dois casos.

Os resultados desse estudo foi a utilização de uma *Backlight* difusa de alta intensidade, como resposta ao brilho causado pela superfície metálica, que permite detectar alguns dos defeitos homólogos aos que existem no modelo 1907-211.2: poros, rechupes e riscos (fig. 3.13).

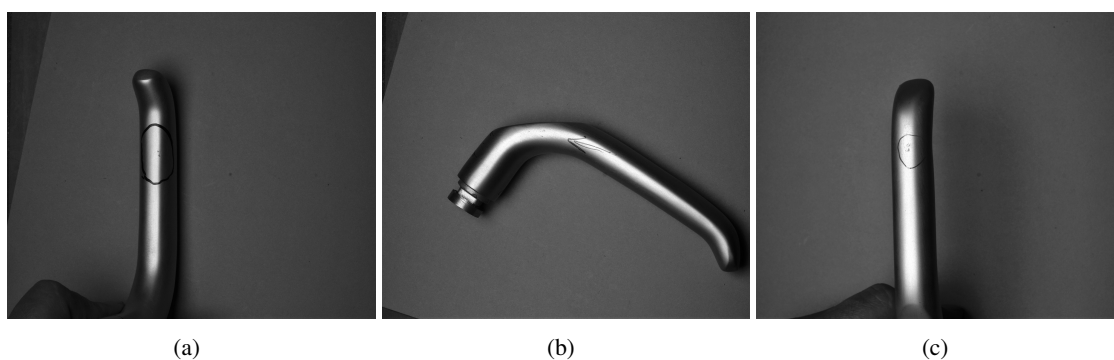


Figura 3.13: Resultados conseguidos pela Infaimon, utilizando uma *Backlight* de alta intensidade numa tentativa de conseguir realçar os diferentes defeitos: **a)** pancadas; **b)** poros; **c)** manchas.

Isto permite validar novamente o uso de técnicas de iluminação difusa como resposta às características da superfície destas peças. Como foi apenas utilizada uma técnica neste estudo, houve defeitos que não se conseguem detectar nas imagens. O problema de utilizar uma técnica deste tipo, é que o custo de uma fonte de luz deste género não consegue ser comportado no âmbito deste projecto. Por isso, utilizam-se os dados resultantes deste estudo para serem aplicados em técnicas semelhantes (de luz difusa) mas mais baratas.

3.4 Projecto do Sistema Mecânico

3.4.1 Requisitos

Um dos objectivos deste trabalho é conseguir projectar e produzir um sistema electromecânico, para que nele sejam feitos testes a aplicações de Visão Industrial, sejam eles testes de iluminação, aquisição de imagem, algoritmos de detecção de *features*, entre outros.

Ao longo deste trabalho foram sendo encontrados vários requisitos a ter em consideração, que se podem resumir nos seguintes:

- Dimensões das peças a estudar;
- Tamanho da câmara e posicionamento em relação ao objecto;
- É necessário ser possível de se fotografar todas as vistas da peça;
- Distância do objecto à câmara fixa, em 250mm (WD);
- Conseguir integrar o maior número de técnicas de iluminação;
- Ter a possibilidade de ser tapado a toda a volta, por causa da iluminação externa;
- Permitir a passagem dos cabos de comunicação e alimentação dos componentes;
- Preço total.

3.4.2 Estrutura Mecânica

Atendendo a estes requisitos, e juntando sempre ideias relativas a possíveis trabalhos futuros, pode-se então começar a pensar numa solução. Estes dados levam-nos então às seguintes considerações:

- Criação de um sistema de suporte com rotação de dois eixos para a peça. Como se pretende obter vistas de todas as faces do objecto a estudar, mas precisa-se que a peça esteja fixa para captura de imagem, pensou-se em recorrer a uma estrutura com pelo menos dois motores em dois níveis diferentes: um motor ligado directamente à peça (motor 1), para que esta rodasse sobre si mesma, e acoplado numa peça em forma de moldura. Por sua vez, esta estaria ligada a um segundo motor (motor 2), que faria rodar toda a sub-estrutura de moldura + primeiro motor + peça, permitindo obter vistas das restantes faces. Os motores utilizados para fazer a rotação seriam passo-a-passo, porque além de serem mais baratos e mais facilmente programáveis, permitem fazer um controlo fino de posição (através do número de passos);

- Permitir a livre movimentação da peça e do seu sistema de fixação. A juntar ao ponto anterior, esta consideração é para que a peça tenha espaço suficiente para rodar 360° sobre si, e que toda a solução descrita acima tenha espaço livre para fazer as rotações necessárias de modo a conseguir obter as orientações pretendidas. Por isso, ao construir a estrutura, ter em atenção o espaço livre que todo o atravancamento vai necessitar, nas várias direcções;
- Junção da câmara com a iluminação e com todo o sistema de rotação da peça, tudo numa estrutura só. Para facilitar o controle de variáveis tais como a WD e alinhamento da câmara, pretende-se combinar os vários constituintes, ligando rigidamente os respectivos suportes onde estes vão estar encaixados. Outra vantagem é, quando se montarem sistemas de iluminação compatíveis, estes fiquem logo alinhados com o resto dos componentes (por exemplo, um domo em frente da câmara);
- Estrutura construída na horizontal. Ao contrário do que costuma aparecer nas representações esquemáticas, o sistema mecânico será feito de maneira a que a câmara esteja alinhada com a peça na horizontal. Como será pensada uma estrutura única que inclua encaixe para a câmara, iluminação e fixação da peça, fazer isto na vertical pode trazer problemas de estabilidade nos pontos mais elevados (câmara). Tendo como única desvantagem o espaço ocupado, a construção na horizontal permite um mais fácil alinhamento da câmara com a peça (e desalinhamento também, se assim for pretendido). Adicionalmente, como vai haver movimentação de motores e peças com alguma massa relativa, ter uma base com uma maior área assente aumenta a estabilidade geral, e reduz o efeito das vibrações;
- Incluir suportes para iluminação e câmara que sejam ajustáveis. Ainda que para este trabalho, a câmara tenha uma WD fixa, pode nem sempre ser o caso no futuro, e no caso da iluminação serve para poder ser livremente ajustada. Mas o ajustável refere-se não só à distância entre os componentes, mas também à altura da câmara. Pode ser preciso alterar o alinhamento e isso terá que ser feito com facilidade;
- Sistema de fixação do objecto que seja flexível. Esta é uma das considerações que mais tem em conta futuros trabalhos, a pedido do INEGI. O mais importante será que consiga fixar as peças que são objecto de estudo neste trabalho, mas pensando numa solução em que as partes utilizadas na fixação possam ser facilmente trocadas fica preparado para o futuro.

Uma primeira iteração da estrutura apresenta-se na fig. 3.14. Começou por se utilizar tubo de alumínio para fazer o suporte da câmara e a base da estrutura, na qual depois assentaria uma peça maciça que faria o suporte de todo o sub-sistema de fixação e rotação do objecto. Inicialmente, o sistema de rotação pensado utilizava 2 motores para a rotação no eixo de Y que estavam fixos em peças ocas que por sua vez estavam fixas à estrutura principal (A ideia de utilizar 2 motores para fazer a rotação do mesmo eixo foi desaconselhada porque, em primeiro lugar, existem problemas em conseguir um perfeito sincronismo dos motores, o que provocaria a torção da estrutura e possivelmente diferentes posições para cada motor; outro motivo é que, sendo os componentes a rodar de baixa massa e inércia total, o uso de um motor com maior potência simplifica o processo de

controlo e permite compensar em termos de custo total). Os ajuste dos componentes móveis era feito através de manípulos normalizados.

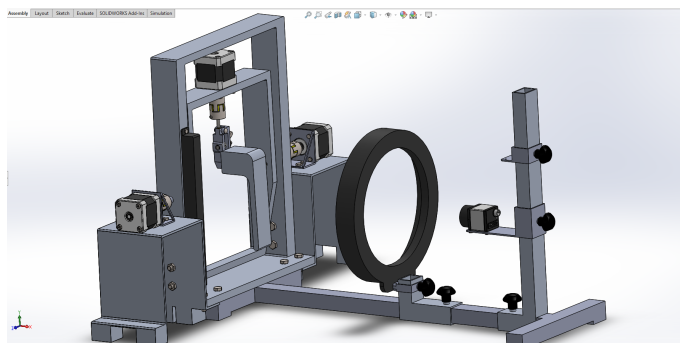
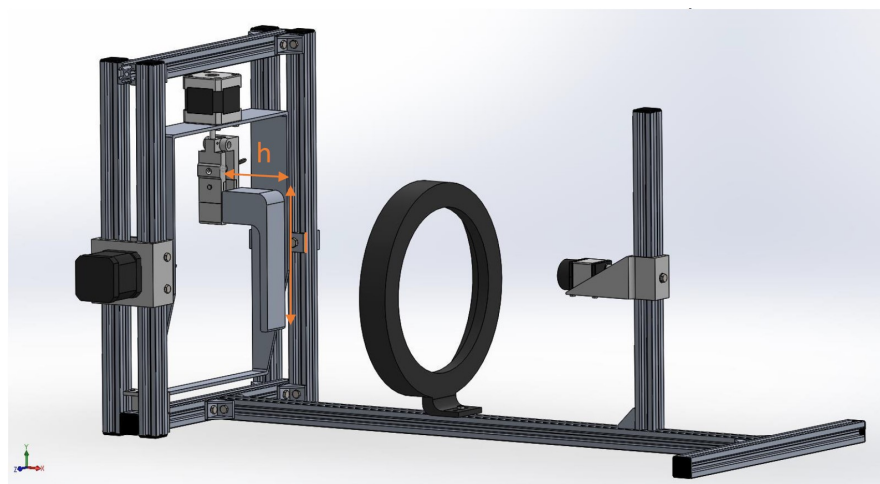


Figura 3.14: Modelo CAD 3D da primeira iteração do sistema electromecânico a construir estando montados, para fins de demonstração, uma técnica de iluminação e um exemplo de um puxador.

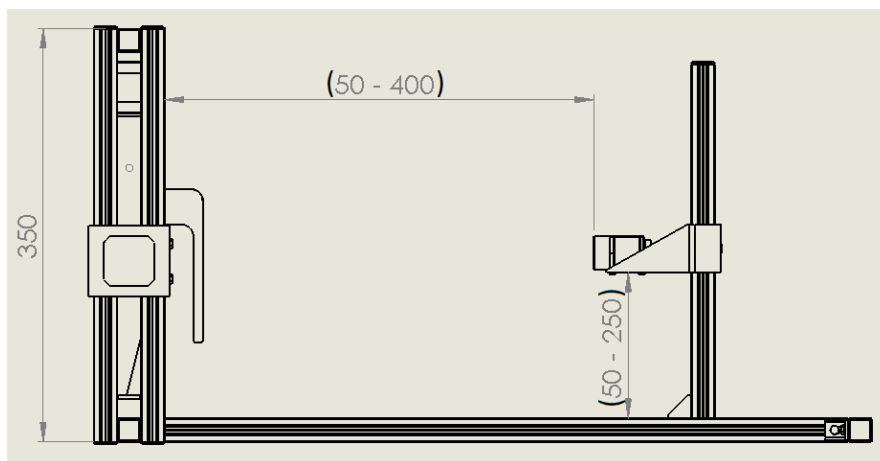
Em reunião com os Engenheiros do INEGI, foram abordados estes problemas e ainda sugeridas outras alterações, que resultaram na estrutura final:

- Utilização de perfis de alumínio para toda a parte rígida do conjunto. Numa tentativa de diminuir os custos e o tempo de produção, foram sugeridos e utilizados perfis de alumínio do tipo *V-Slot*. Este tipo de perfis vem já cortado à medida, tem rápida entrega e preço baixo. Tem também uma grande compatibilidade com outros componentes, e torna fácil a montagem da estrutura, ao utilizar partes normalizadas tais como cantos, suportes universais, porcas em T e respectivos parafusos.
- Utilização de apenas um motor para a rotação de cada eixo e mudança de acoplamentos. Tal como explicado anteriormente, o uso de 2 motores foi descontinuado. Os acoplamentos também foram modificados: no caso do motor 1 foi decidido retirar o acoplamento porque a vibração resultante da rotação do motor, com o acoplamento, faz com que o sistema de fixação da peça demore demasiado tempo até estabilizar para se poder fotografar; no caso do motor 2, foi mudado o acoplamento para um rígido, que é suficiente para as exigências de rotação do sistema e mais barato.
- Fixação do motor exterior directamente à estrutura. Em vez de serem colocados em peças de grande dimensão adicionais, foi recomendado que os motores tivessem apenas um pequeno suporte que os juntasse aos perfis, já que estes teriam características mecânicas suficientes para suportar o peso do motor.
- Possibilidade da utilização da impressão 3D. O INEGI disponibilizou a sua impressora 3D por extrusão para fabrico de pequenas peças. Isto possibilitou que pequenos suportes desenhados à medida fossem produzidos rapidamente e com baixo custo, com a vantagem de se poderem ir iterando as medidas finais destas peças, depois de experimentadas.

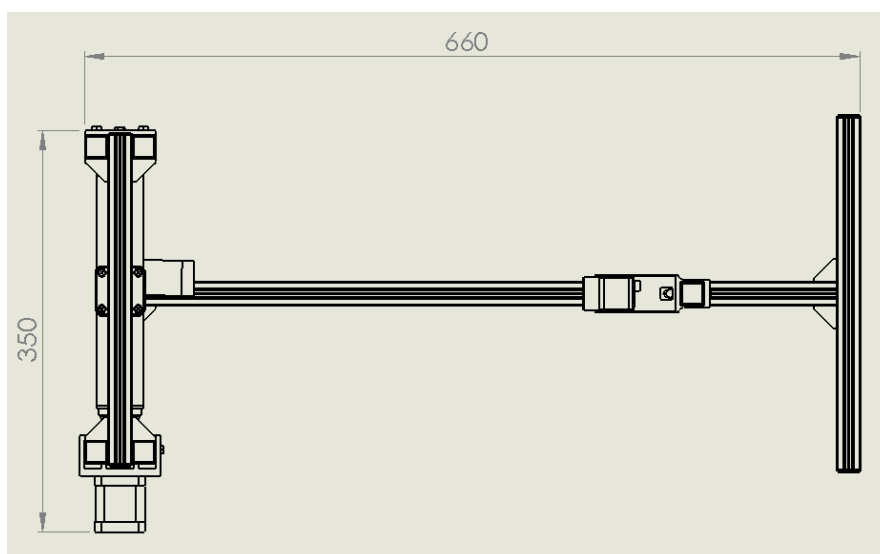
No final, com as devidas mudanças, a estrutura que foi construída ficou com a seguinte configuração (fig. 3.15):



(a)



(b)



(c)

Figura 3.15: Configuração final da estrutura mecânica: **a)** Modelo CAD 3D do sistema completo, com indicação da numeração dos motores; **b)** e **c)** Desenhos com as medidas de atravancamento gerais da estrutura.

3.4.3 Métodos de fabrico das peças

Tendo em conta o tipo de geometria de cada peça e a sua utilização, recorreu-se a diferentes métodos de fabrico para as diferentes peças que constituem a estrutura mecânica. Os perfis V-Slot, as junções de canto e suportes em "L" são peças em alumínio que são encomendadas directamente ao fabricante prontas a montar, apenas variando o seu comprimento do perfil, consoante o tamanho pretendido.

Quanto aos suportes tanto do motor 2 como da câmara, estes foram fabricados utilizando um processo de impressão 3D por extrusão, utilizando como material o Nylon. Foi escolhido este método de fabrico, porque estas peças têm uma geometria complexa, mas com requisitos mecânicos baixos (não necessitam de suportar grandes cargas ou esforços). Como são de baixo custo, mas rápida construção, foi possível iterar estes componentes, experimentando montá-los directamente na estrutura e alterando as dimensões no modelo, até chegar à peça final. Foi utilizado o Nylon para a impressão 3D, porque era o material que estava disponível no INEGI para ser utilizado na impressora 3D disponível, o que permitiu obter peças com boa rigidez (comparando com outros materiais utilizados na impressão 3D), mas como as dimensões das peças produzidas andam na ordem dos milímetros, os furos pretendidos tiveram que ser refeitos após impressão, bem como a lixagem de algumas faces interiores dos suportes, para montagem nos perfis.

As peças relativas à transmissão do movimento do motor 2 até à moldura e a própria moldura foram fabricados nas oficinas do INEGI. Os veios e a porca de transmissão foram maquinados, utilizando como material o alumínio. No caso da moldura, feita à medida, foi utilizada uma chapa de 2mm de espessura, furada e depois quinada para ficar com a forma pretendida.

3.4.4 Pormenores de construção

Nesta subsecção serão mostrados e explicados os detalhes relativos à estrutura mecânica. Serão utilizadas imagens do modelo 3D, em vez fotografias da estrutura real por motivos de clareza e de falta de qualidade da máquina fotográfica disponível para o efeito. No entanto, o sistema montado é em tudo semelhante ao que se pode ver no modelo 3D.

3.4.4.1 Sistema de fixação do objecto a estudar

Tal como referido nos requisitos, tem como objectivo fixar o objecto que se pretende fotografar. Tem que funcionar para o caso dos puxadores utilizados neste trabalho, mas com a possibilidade de ser trocada. As medidas máximas para a peça a fixar são de 100 mm de altura e 200 mm de comprimento ("h" e "l" marcados na fig. 3.15 a)) e são limitadas não pelo sistema de fixação em si, mas pelo atravancamento da estrutura exterior. O princípio de funcionamento não é muito complexo. Sendo parecido com o funcionamento de uma garra, este sistema divide-se em duas metades, que estão unidas na parte superior por parafuso e porca, permitindo rotação e a abertura ou fecho da "garra". Na parte central está um parafuso dentro de uma mola que atravessa as duas metades, que de um lado está preso por um pequeno pino dobrado (na 3.16, do lado direito) e do outro tem uma porca de orelhas (na mesma figura, do lado esquerdo). Ao rodar a porca de orelhas,

permite controlar a abertura e fecho deste sistema, com a ajuda da mola no caso da abertura. As medidas funcionais da garra (máxima e mínima de abertura) são de 21 e 7 mm, respectivamente, como mostrado na fig. 3.16, suficientes os puxadores escolhidos, fixando-os pela parte do puxador utilizada para montagem, que mede aproximadamente 10.8 mm (no Anexo B, a secção A).

Numa das metades, uma das extremidades (na fig. 3.16 na parte de cima) tem um furo que permite a ligação ao motor 1, que faz a rotação da peça sobre si. Cada metade está também dividida em duas partes, apertadas com um parafuso, para permitir a fácil troca de modo de fixação. As quatro partes das duas metades são fabricadas utilizando a impressão 3D por extrusão, sendo o material o Nylon. Os parafusos, molas e porcas são peças normalizadas, de aço.

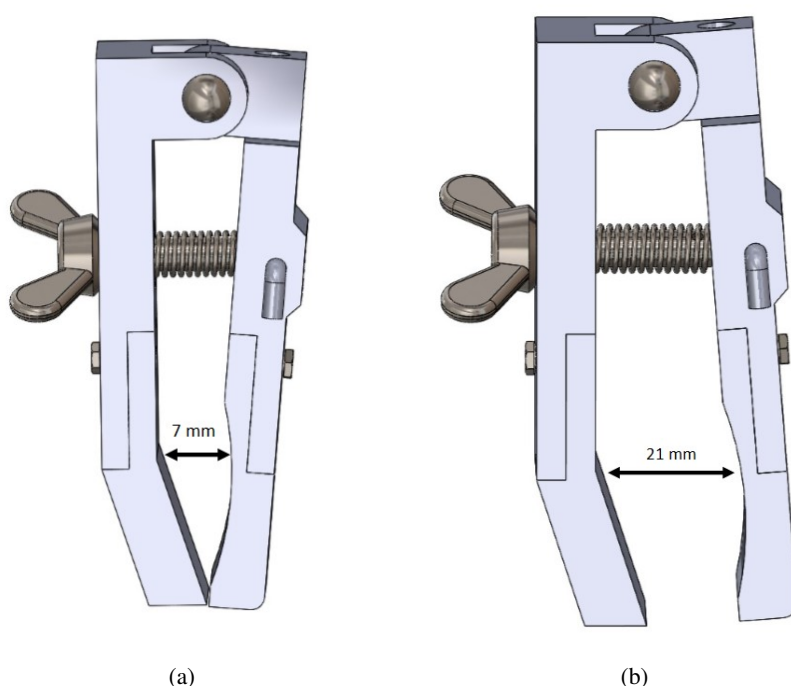


Figura 3.16: Pormenor do sistema de fixação: **a)** posição de uso (fechado); **b)** aberta até ao máximo de amplitude.

3.4.4.2 Moldura interior em alumínio

Uma das peças principais desta estrutura é a moldura de alumínio que suporta o motor 1 e o sistema de fixação + objecto. Feita por quinagem de chapa, a espessura que estava disponível era de 2 mm, dimensão mais do que suficiente para suportar o peso de um pequeno motor e do sistema de fixação. Na 3.17 está uma vista geral da peça, com os furos preparados para o encaixe do motor (em cima) e de uma peça para transmissão do movimento (lado esquerdo da figura). O furo do lado direito serve apenas para que seja colocado um veio de suporte adicional. Esta moldura tem duas medidas de largura diferentes na parte superior e inferior. A parte superior tem que ter tamanho suficiente para encaixar o motor, enquanto que a parte inferior é mais fina para que a moldura não interfira na fotografia tirada à vista inferior da peça.

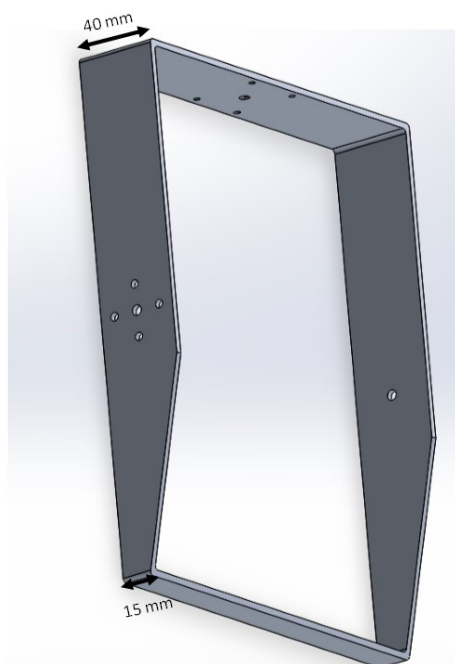


Figura 3.17: Moldura de alumínio, antes da montagem.

3.4.4.3 Suporte da câmara

Este suporte tem a simples, mas importante função de suportar a câmara. Impressa em 3D por extrusão utilizando Nylon, esta peça tem as medidas adaptadas à câmara escolhida, com 4 furos da parte de baixo para sua fixação, um furo para a passagem do cabo USB e espaço para o seu encaixe (fig. 3.18). Possui suportes laterais para aumentar a robustez, e é fixado ao perfil utilizando um parafuso e porca em T. Permite que, depois de devidamente calibrada a posição da câmara em relação ao objecto, a câmara se mantenha fixa e sem desvios de posição.

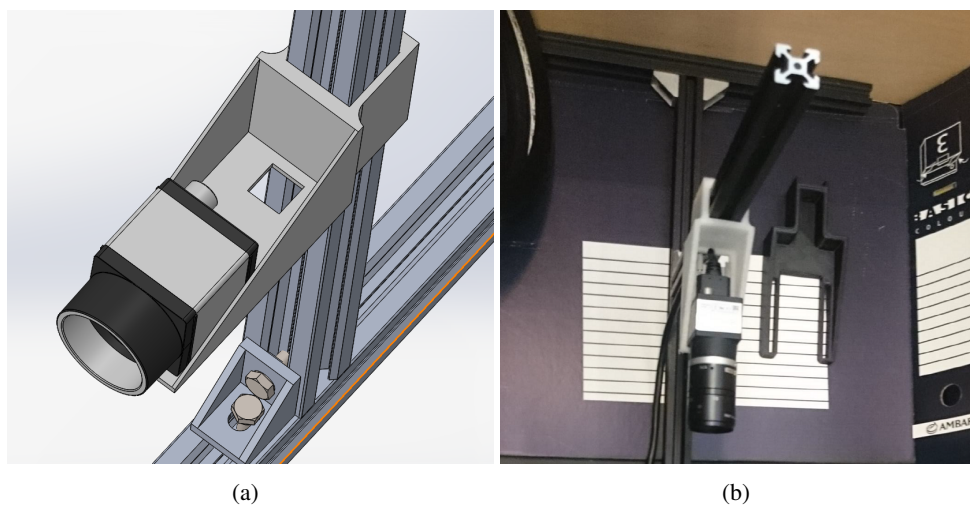


Figura 3.18: Vistas do suporte da câmara: **a)** modelo 3D; **b)** fotografia após montagem

3.4.4.4 Sistema de rotação de dois eixos

O funcionamento de algo deste género foi já explicado anteriormente, servido agora as imagens como apoio visual à compreensão do conceito. Existem dois níveis de rotação, o primeiro é feito pelo motor 1, que está ligado directamente ao sistema de fixação, que roda solidário com a peça. Como se pode ver na fig. 3.19, a rotação deste motor permite a visualização das peças em quatro das suas vistas (frente, trás e os dois lados).

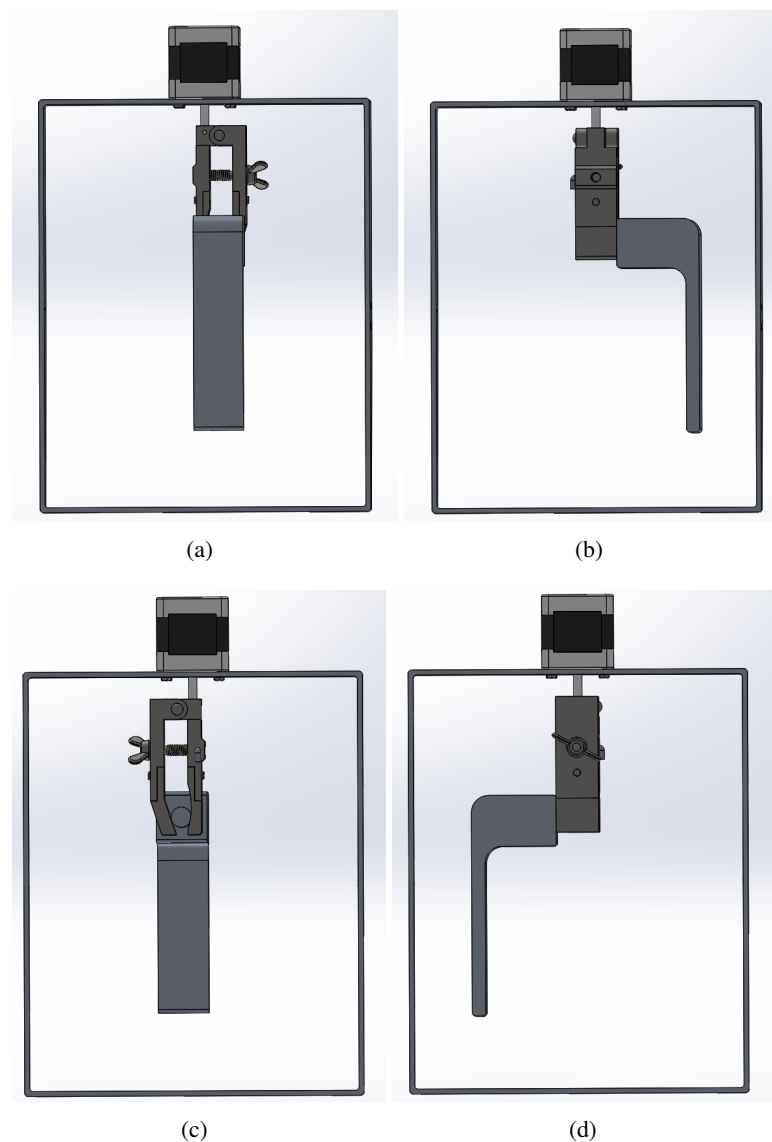


Figura 3.19: As quatro vistas que são possíveis com a rotação do motor 1: **a)** frente; **b)** lado direito; **c)** trás; **d)** lado esquerdo

As restantes duas principais vistas são conseguidas através da rotação do motor 2 que está um nível acima. Este motor está acoplado a uma peça tipo moldura onde está montado o motor 1, e

ao movimentar-se provoca a rotação solidária da moldura, motor 1, sistema de fixação e puxador. Esta movimentação cria duas novas posições, tal como demonstrado na fig. 3.20.

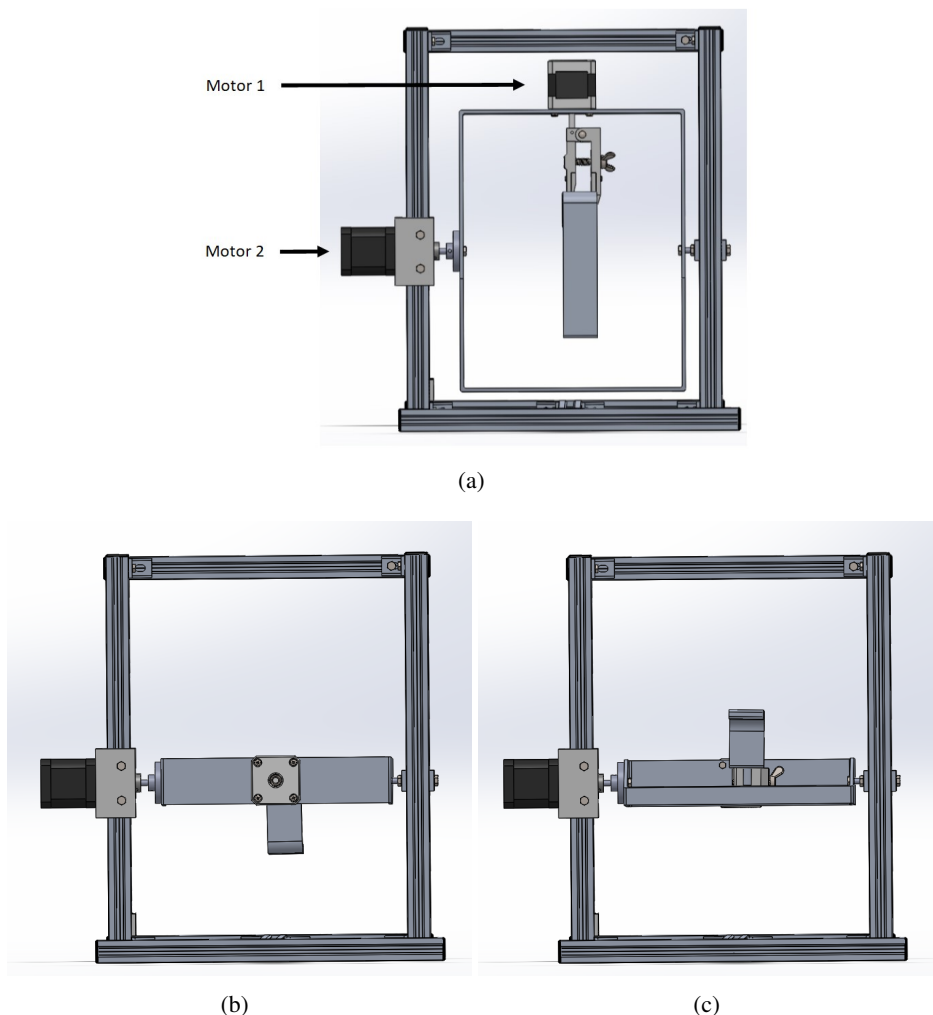


Figura 3.20: As posições que se pretendem, utilizando o motor 2: **a)** posição normal; **b)** vista de cima; **c)** vista de baixo

3.4.4.5 Escolha dos motores

modo de funcionamento do ponto anterior assenta em haver dois motores, devidamente seleccionados para o efeito. Os motores serão ambos passo-a-passo, por razões já explicadas, e a escolha foi feita consoante o catálogo de modelos disponíveis no fornecedor das peças normalizadas da estrutura (a compra dos perfis e acessórios foi feita numa loja de materiais para impressoras 3D).

Para o caso do motor 1, pode-se simplificar a escolha porque este motor apenas suporta o sistema de fixação e o puxador, com uma massa conjunta aproximada de apenas 258g, e porque o centro de massa de toda esta estrutura se situa bastante perto do eixo de rotação do motor, devido à geometria das partes. Para se ter alguma margem de manobra, e considerando que no futuro se

podem utilizar peças mais pesadas, é escolhido um modelo da gama Nema17 (MT-1702HS133A, *datasheet* em [55]), com um binário de suporte de 3,2 kg.cm, precisa de 1.33 amperes por fase e tem uma massa de 220g.

Tabela 3.6: Principais característica do motor Nema17 MT-1702HS133A [55].

Modelo	Corrente Nominal (Amps/fase)	Binário de Suporte (kg.cm)	Resistência (Ohms/fase)	Indutância (mH/fase)	Inércia (g.cm ²)	Binário de Manutenção (g.cm)	Massa (kg)	Tensão Recomendada (V DC)
MT-1702HS133A	1,33	3,2	2,1	2,5	35	120	0,22	12-24

Para o motor 2, teve que ser considerada a situação limite e estudado o binário mínimo necessário. No caso deste sistema, a situação que pode causar mais problemas ao motor é quando a estrutura que ele roda fica paralela ao plano da base, mais concretamente quando está na posição mostrada na fig. 3.21

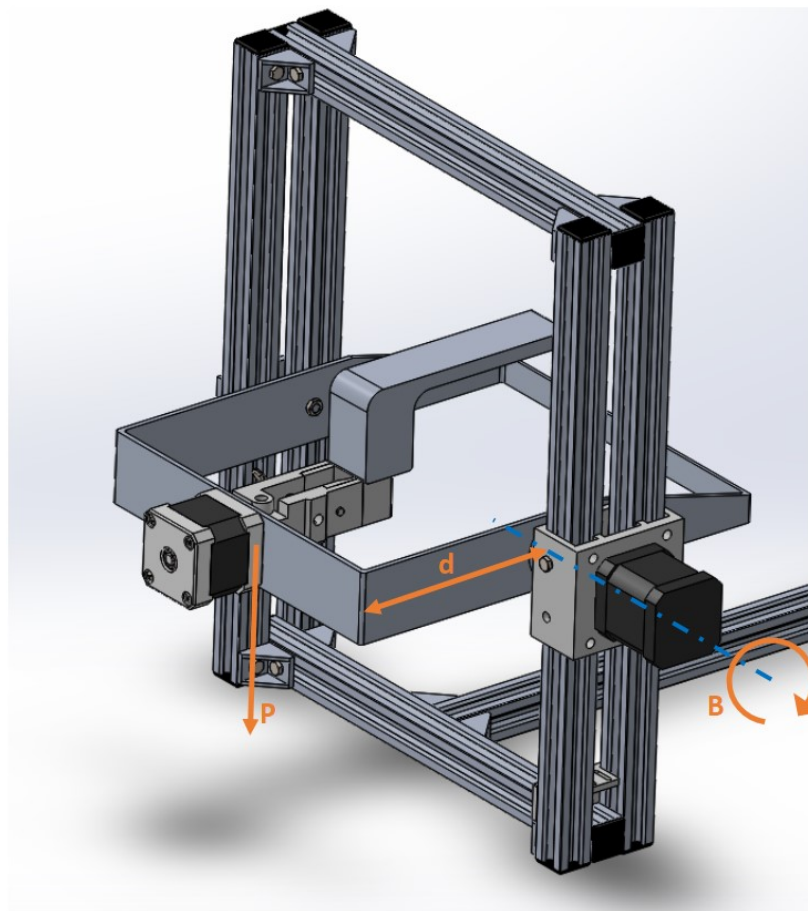


Figura 3.21: Situação limite para a qual o motor 2 é projectado

Esta posição é quando o centro de massa está mais longe do eixo do motor, sendo aplicado o maior valor de binário. Para calcular esse valor, considera-se que é gerado um binário provocado pelo peso dos componentes, quando o sistema está na situação limite. Sabendo a massa do sistema de fixação+objecto (258g), junta-se a massa do motor 1 (220g), da moldura em alumínio (estimada em 312g) e do acoplamento (do catálogo, 52g) para se obter uma massa total de 854g, ou 0.854kg.

Para a distância ao eixo faz-se uma aproximação para o valor da distância do eixo do motor até à face superior da moldura de alumínio. Esta parece ser uma aproximação razoável, visto que esse é o ponto onde está fixo o motor 1 e todo o sub-sistema de fixação+objecto, e que ambos possuem massas na mesma ordem de grandeza. A distância será então 125cm, ou 0.125m (**d**).

Multiplicando a massa total pela força da gravidade para se ter o valor do peso (**P**), e multiplicando o resultado pela distância, obtém-se o valor de 1.03145 N.m para o Binário (**B**). Aplica-se um coeficiente de segurança de 15% por causa das aproximações feitas e para compensar os efeitos de aceleração e travagem, e converte-se o valor para kg.cm (unidades utilizadas nos *datasheets* disponíveis) resultando em 12.1kg.cm.

Pegando no valor conseguido, terá que ser utilizado um motor Nema23 modelo MT-2303HS200AW, com binário de suporte de 12.6kg.cm. Este é um motor bastante mais robusto que o outro, com maiores dimensões e massa, precisando de 2 amperes por fase para funcionar [56].

Tabela 3.7: Principais característica do motor Nema23 MT-2303HS200AW [56].

Modelo	Corrente Nominal (Amps/fase)	Binário de Suporte (kg.cm)	Resistência (Ohms/fase)	Indutância (mH/fase)	Inércia (g.cm ²)	Binário de Manutenção (g.cm)	Massa (kg)	Tensão Recomendada (V DC)
MT-2303HS200AW	2,0	12,6	1,4	5,1	300	400	0,72	24-48

3.4.4.6 Transmissão do movimento dos motores à restante estrutura

Para que o motor 2 provoque o movimento desejado, tem que haver transmissão de rotação desde o veio do motor até à moldura de alumínio. Devido ao pouco comprimento do veio que sai do motor, é necessário utilizar um acoplamento rígido para uma primeira transmissão de movimento para um veio auxiliar. Esse veio auxiliar está rigidamente ligado a uma peça cilíndrica que por sua vez vai estar rigidamente ligada à moldura, fazendo com que, rodando o veio auxiliar, tudo o resto roda solidário. A peça cilíndrica, ao qual darei o nome de porca de transmissão, está fixa na moldura através de quatro furos onde vão ser colocados quatro parafusos com porca, e acoplada ao veio através de um furo na sua face redonda mais pequena, onde é colocado um parafuso que ao ser apertado contra o veio provoca a transmissão do movimento (fig. 3.22). A solução inicial fazia passar um parafuso através da porca de transmissão e do veio, mas devido ao reduzido diâmetro do veio (5 mm), e porque a velocidade de rotação não vai ser elevada, a pressão exercida pelo parafuso é suficiente para garantir a rigidez da ligação.

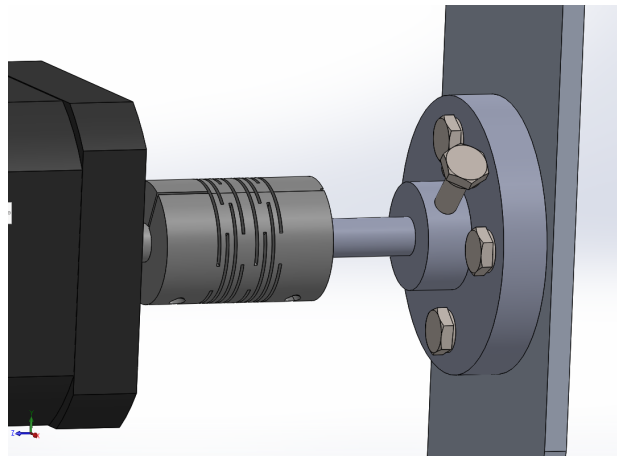


Figura 3.22: Pormenor relativo aos acoplamentos feitos para transmissão do movimento do motor 2. Foram escondidos os perfis e o suporte do motor para que fosse mais clara a imagem.

3.4.4.7 Suporte adicional

Este suporte é apenas um veio no qual a moldura de alumínio está apoiada, para melhor distribuir o peso resultante de todo o sistema incluído nesta, no lado oposto ao do motor 2. O veio está por sua vez apoiado em duas chapas de alumínio que estão fixas aos perfis, tal como mostra a [fig. 3.23](#)

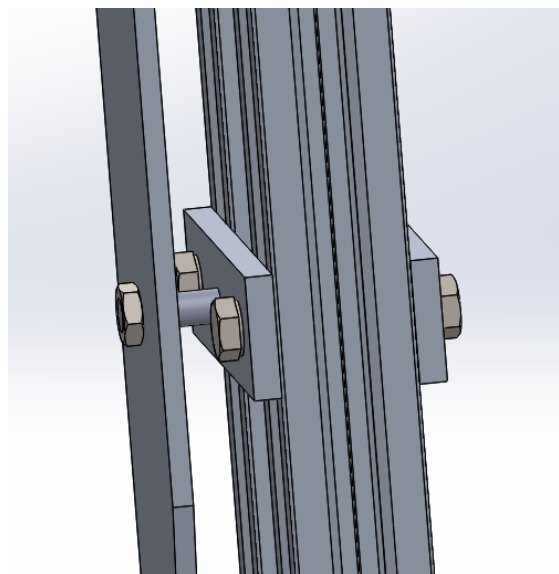
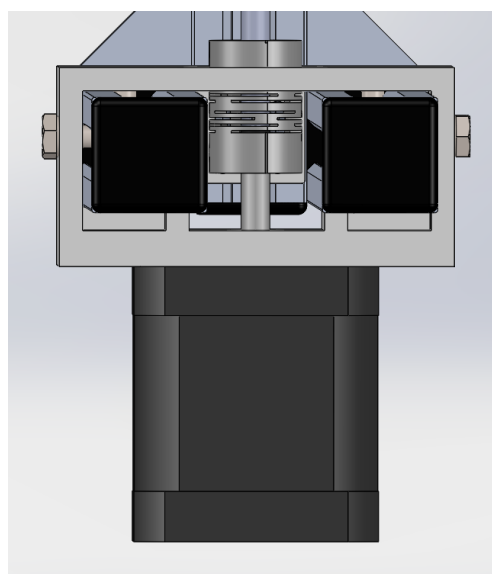


Figura 3.23: Detalhe do veio de suporte adicional juntamente com as chapas que o seguram.

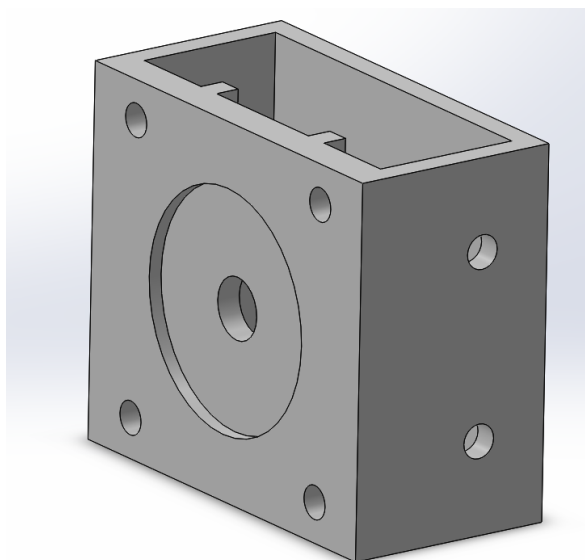
3.4.4.8 Suporte do motor 2

Esta peça é a que segura o motor ao resto da estrutura. Teve que se ter em atenção as dimensões do motor e o acoplamento, bem como o espaço existente entre os dois perfis que fazem a estrutura ([fig. 3.24 a](#))). Numa das faces está a furação para fixar o motor e um rasgo com um furo central

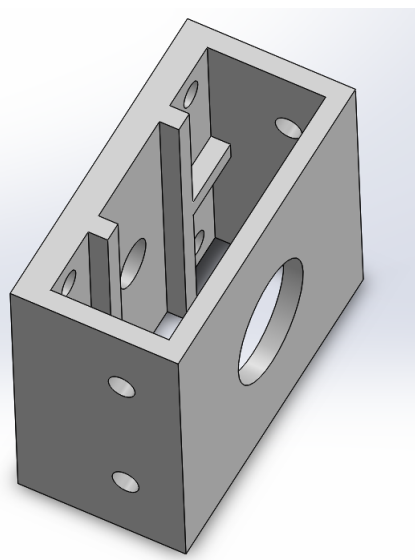
para o encaixe deste (fig. 3.24 b)). Na face oposta está um furo que permite a passagem do acoplamento (fig. 3.24 c)). Outro pormenor desta peça é a face interior que contém saliências para criar espaço entre a face o perfil, de maneira a possibilidade de montagem dos parafusos que fixam o motor. Esta peça é, também ela, fabricada por impressão 3D por extrusão em Nylon.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.24: Pormenor da montagem do motor 2 e o suporte impresso em 3D: **a)** posição do motor+acoplamento entre os perfis; **b)** vista de um lado do suporte do motor 2 apenas; **c)** vista do lado oposto do suporte do motor 2.

3.4.4.9 Fim de curso

Quando são utilizados motores eléctricos passo-a-passo, é comum haver uma referência de posição para que, quando a energia for reiniciada, o sistema consiga encontrar um ponto de posição conhecido e a partir daí fazer o seu funcionamento normal. Neste caso, é especialmente importante no caso do motor 2, que convém começar na posição em que a sub-estrutura esteja na vertical, posição para a qual estão calibradas todas as outras vistas. Portanto foi pensada uma peça, construída em Nylon utilizando a impressão 3D por extrusão, para servir de suporte para montar um fim-de-curso. Este fim de curso, à partida mecânico, será actuado quando por lá passar a parte inferior da moldura de alumínio, como se pode ver na fig. 3.25.

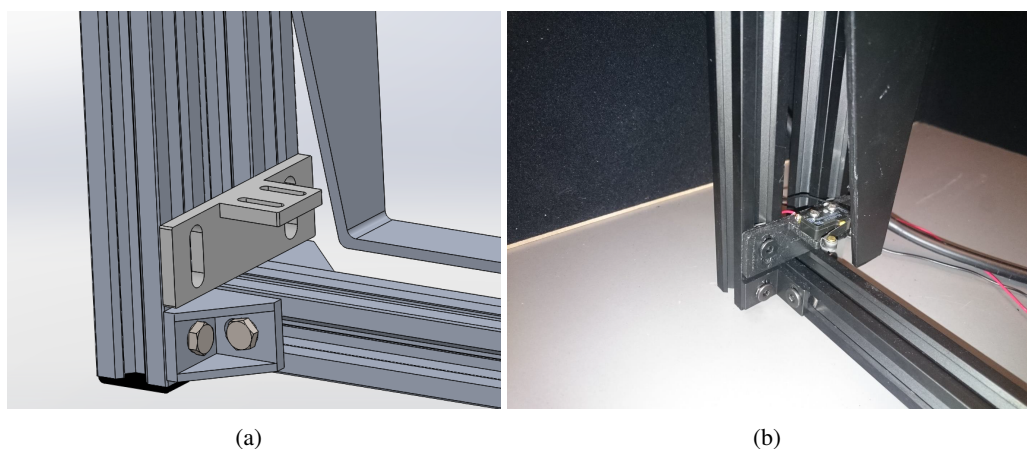


Figura 3.25: Detalhe da posição do fim-de-curso, na zona abaixo do motor 2: **a)** vista do suporte, no modelo 3D; **b)** fotografia do fim de curso montado

3.4.4.10 Pintura das peças

Visto que esta é uma estrutura para ser utilizada na captura de imagens, tem que se tentar que a estrutura cause o mínimo de interferência no processo. Assim sendo, visto que as peças do sistema mecânico são na sua maioria metálicas, é preferível que tenham algum tipo de pintura preta, para diminuir a sua reflectividade. No caso dos perfis, no acto da compra havia já a opção de serem pintados de preto. Nas outras peças todas, foi feita uma pintura utilizando *spray* preto antes da montagem criando assim melhores condições de fotografia, diminuindo as possíveis interferências.

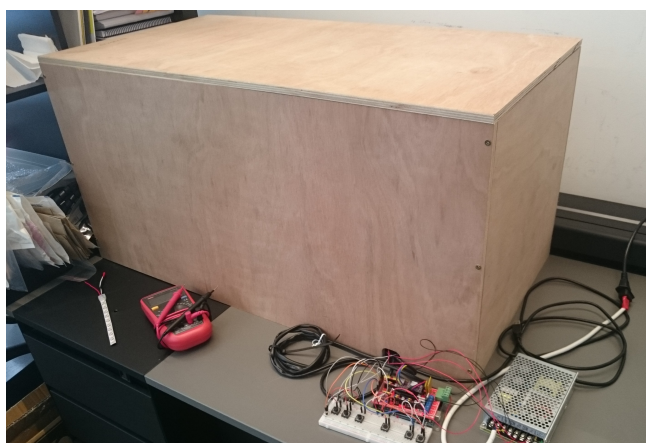
3.4.5 Sequência de montagem

Este sistema mecânico é de relativa simplicidade, principalmente por causa do uso de perfis de alumínio normalizados e as respectivas peças de encaixe universal. Começa-se pela montagem da parte exterior da estrutura, que utiliza esses mesmos perfis, encaixando-os entre si utilizando os suportes em L. Antes de montar o perfil que faz de trave superior, instalar o suporte do motor 2 nos perfis que estão na vertical, com os quatro parafusos de fixação já alinhados e colocados no suporte com a rosca virada para a parte de fora dos perfis. Após estar completa a moldura exterior

com o suporte do motor 2, montar esse mesmo motor nos parafusos previamente preparados e colocar as chapas do suporte adicional no lado oposto ao do motor, alinhando-as com o seu eixo. Depois, instalar o acoplamento rígido no veio do motor e no veio auxiliar, assegurando que não existem folgas. À parte, montar o sub-sistema de moldura interior de alumínio + motor 1 + sistema de fixação + porca de transmissão. O próximo passo é instalar o sub-sistema, mas antes disso há que verificar se há espaço suficiente para que caiba o que vai ser montado, mudando a posição dos suportes no perfis e re-alinhar, caso necessário. Com o posicionamento pronto, encaixa-se o sistema montado à parte no veio de transmissão auxiliar e colocando o veio de suporte adicional, de maneira a facilitar esta montagem. Nesta fase faz-se um novo alinhamento, garantindo com a moldura interior de alumínio está com a face superior paralela à trave da moldura exterior e que não está sujeita a torsões ou flexões. Com a parte principal completa, falta montar a restante base, em forma de T, de perfis de alumínio e alinhar com o veio do motor 1. Por fim, instala-se a câmara no devido suporte e este último num perfil que será montado na vertical. O sistema fica assim completo (tal como na fig. 3.26 a)). Para se reduzir a influência da luz ambiente, foi ainda construída uma caixa em madeira, com uma tampa na parte superior, criando assim escuridão para se poder melhor controlar a iluminação, mas com fácil acesso ao sistema (fig. 3.26 b)).



(a)



(b)

Figura 3.26: Fotografia do sistema após montagem: **a)** estrutura montada, caixa aberta; **b)** caixa fechada

3.4.6 Soluções de iluminação construídas

Depois de terem sido feitos testes de iluminação preliminares nas peças, chegou-se à conclusão que seria uma grande mais valia poder utilizar as técnicas de Domo e de *Dark Field Ring*. Como é explicado mais à frente, as fontes de iluminação que estavam disponíveis para realização dos verdadeiros testes não incluíam estas técnicas, ou tinham grandes limitações para o fazer. Foram pensadas duas peças que, juntamente com a integração de fitas de LED (semelhantes às já utilizadas) no seu interior, colmassem essa falha. Foi solicitado a sua produção utilizando técnicas de impressão 3D por estereolitografia, porque as peças têm dimensões acima daquelas suportadas pelo método de extrusão; adicionalmente, este método de impressão 3D permite uma maior qualidade das peças produzidas, com melhor toleranciamento dimensional e com a cor preta.

No caso do *Dark Field Ring*, foi criado um anel com paredes finas. A fita de LED seria colada na face interior do anel, fazendo com que o ângulo de incidência seja menor e a intensidade luminosa que chega à peça mais baixa também. Como se pode ver na fig. 3.27 em especial na vista em corte, está projectada uma espécie de calha onde é posta a fita de LED com um pequeno furo para se passarem os cabos de alimentação e programação da fita. Neste anel cabe uma fita *neopixel* RGBW com 36 LEDs no total, que resulta numa boa dispersão dos LEDs. A integração na estrutura desenhada é feita através dos furos existentes na base, que são compatíveis com os perfis de alumínio utilizados e respectivos parafusos/porcas, permitindo o fácil alinhamento com a peça e câmara. O desenho deste anel está disponível no Anexo E.



Figura 3.27: Anel de *Dark Field* projectado: **a)** vista do anel inteiro; **b)** vista em corte.

Para o Domo, tentou-se corresponder a forma com aquela encontrada na literatura: a de uma semi-esfera com um furo para que a câmara consiga fotografar. Mostrado na fig. 3.28, especialmente na vista em corte, vê-se que na face interior plana do Domo existe uma calha para ser colocada a fita de LEDs, com uma fina parede do lado interior, para evitar escapar luz que possa incidir de forma directa. A face arredondada interior foi pintada de branco (tinta em spray) para aumentar a sua reflectividade. Cabem nesta peça 30 LEDs no total, espalhados por toda a calha. Para a montagem dos LEDs RGB teve que se proceder a tarefas adicionais, dividindo a fita em pequenos trechos de 2-3 LEDs cada, colados no Domo e de seguida soldados. Esta peça também tem uma base com furos para ser montada nos perfis da estrutura e facilmente é alinhada. O desenho deste domo está disponível no Anexo G.

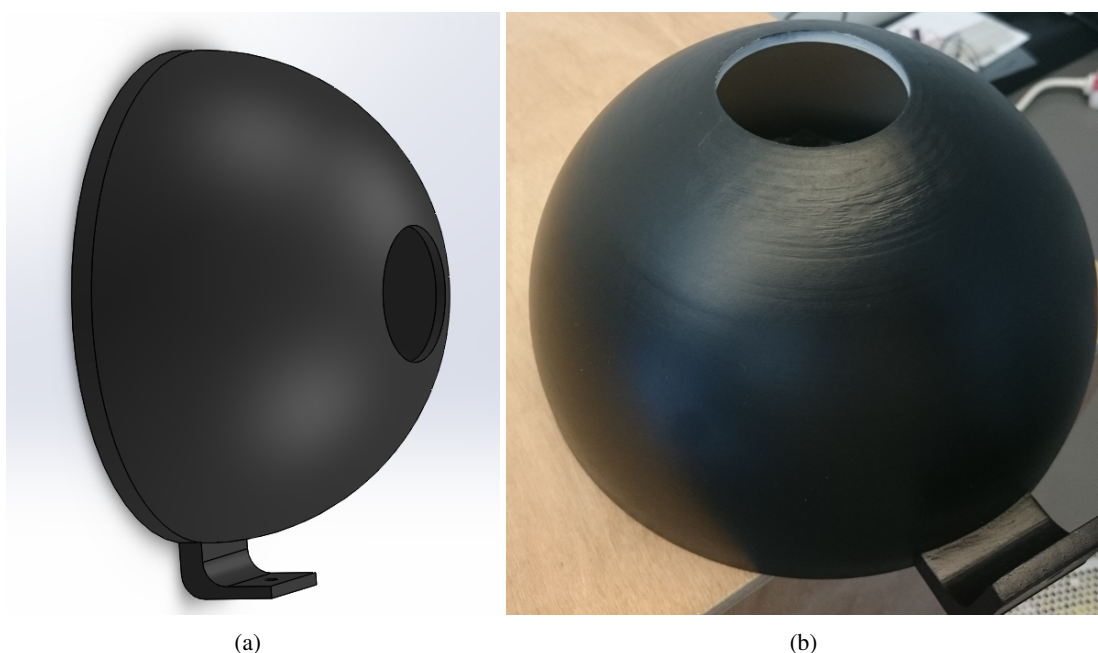


Figura 3.28: Domo projectado: **a)** vista do anel inteiro; **b)** vista em corte.

Aqui apenas se aborda a construção das peças que permitam ser possíveis as técnicas de Domo e *Dark Field*. A alimentação e programação são tratadas na próxima secção, a parte electrónica.

3.5 Sistema Electrónico

Nesta secção serão mostrados e explicados os circuitos construídos e o funcionamento dos diversos componentes electromecânicos, nomeadamente os motores, os elementos do seu controlo e a iluminação montada. Dentro do funcionamento vai estar incluída a parte eléctrica e a parte da programação feita.

3.5.1 Funcionamento dos motores

Para simplificação, a partir de agora os motores serão distinguidos apenas pelo seu número *Nema*. Pegando nos motores escolhidos na secção anterior, retira-se dos *datasheets* [55, 56] os dados principais em termos eléctricos. São eles:

Tabela 3.8: Principais característica do motor Nema17 MT-1702HS133A [55].

Modelo	Corrente Nominal (Amps/fase)	Binário de Suporte (kg.cm)	Resistência (Ohms/fase)	Indutância (mH/fase)	Inércia (g.cm ²)	Binário de Manutenção (g.cm)	Massa (kg)	Tensão Recomendada (V DC)
MT-1702HS133A	1,33	3,2	2,1	2,5	35	120	0,22	12-24

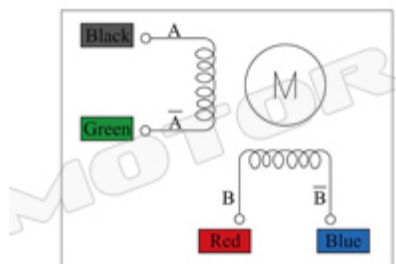


Figura 3.29: Esquema eléctrico dos enrolamentos do motor Nema17, com o respectivo esquema de cores dos cabos [55].

Tabela 3.9: Principais característica do motor Nema23 MT-2303HS200AW [56].

Modelo	Corrente Nominal (Amps/fase)	Binário de Suporte (kg.cm)	Resistência (Ohms/fase)	Indutância (mH/fase)	Inércia (g.cm ²)	Binário de Manutenção (g.cm)	Massa (kg)	Tensão Recomendada (V DC)
MT-2303HS200AW	2,0	12,6	1,4	5,1	300	400	0,72	24-48

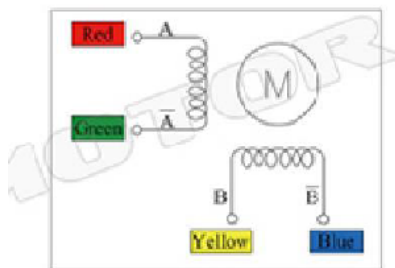


Figura 3.30: Esquema eléctrico dos enrolamentos do motor Nema23, com o respectivo esquema de cores dos cabos [56].

3.5.2 Escolha do método de controlo

A programação dos motores foi considerada desde o momento em que se sentiu a necessidade de os ter no sistema mecânico. Uma vantagem adicional de utilizar modelos de motores passo-a-passo correntes é o facto destes serem utilizados por uma grande comunidade de pessoas, e serem montados numa variedade de aplicações, o que aumenta o material de estudo existente sobre este assunto. A mais utilizada ferramenta de programação para controlo de motores é o *Arduino*, que é de fácil aprendizagem e permite implementação de outros elementos para além dos motores, como foi o caso da fita de LED utilizada na secção dos teste iniciais de iluminação. Como já se está familiarizado com este tipo de linguagem, e sabendo das vantagens descritas acima, foi optado pelo uso de uma placa *Arduino* (e sua programação) para grande parte do controlo electrónico feito neste trabalho.

Para haver movimento num motor passo-a-passo, fornece-se energia aos seus enrolamentos numa ordem específica. Mas para que o motor funcione, a corrente necessária é demasiado alta para a grande maioria dos microcontroladores (caso do *Arduino*), por isso recorrem-se a *drivers*. Os *drivers* conseguem aguentar as altas correntes dos motores, recebendo instruções para o seu controlo vindas do micro. Por isso, este trabalho não será excepção e utilizará *drivers* para os motores.

A utilização de *drivers* requer a criação de circuitos de ligação tanto ao motor como ao *Arduino*. Para facilitar estas interfaces é costume utilizar *controller boards*, placas que são adicionadas ao *Arduino* e que além de conter todas funcionalidades precisas para integrar os *drivers* e os motores, possuem características extra que podem ser úteis. Como este é um sistema com dois motores e iluminação para controlar, optou-se por utilizar uma placa destas. Para que seja possível a sua utilização, é necessário um maior número de pinos disponíveis, pelo que a placa *Arduino* UNO utilizada anteriormente não será suficiente. Portanto, será mudado o modelo para uma placa *Arduino* Mega 2560, que estava disponível no INEGI, para garantir compatibilidade. Quanto ao modelo da *controller board*, o critério utilizado foi o de maior número de características e a de melhor documentação, por isso foi escolhida uma placa normalmente utilizada para impressoras 3D, a RAMPS 1.4 [57]. Esta placa tem capacidade para até 5 *drivers* de 5 motores diferentes,

permitindo precisão de controle de *microstep* até 1/32, integração de fins de curso e pinos de uso geral, que serão utilizados para as outras acções pretendidas.

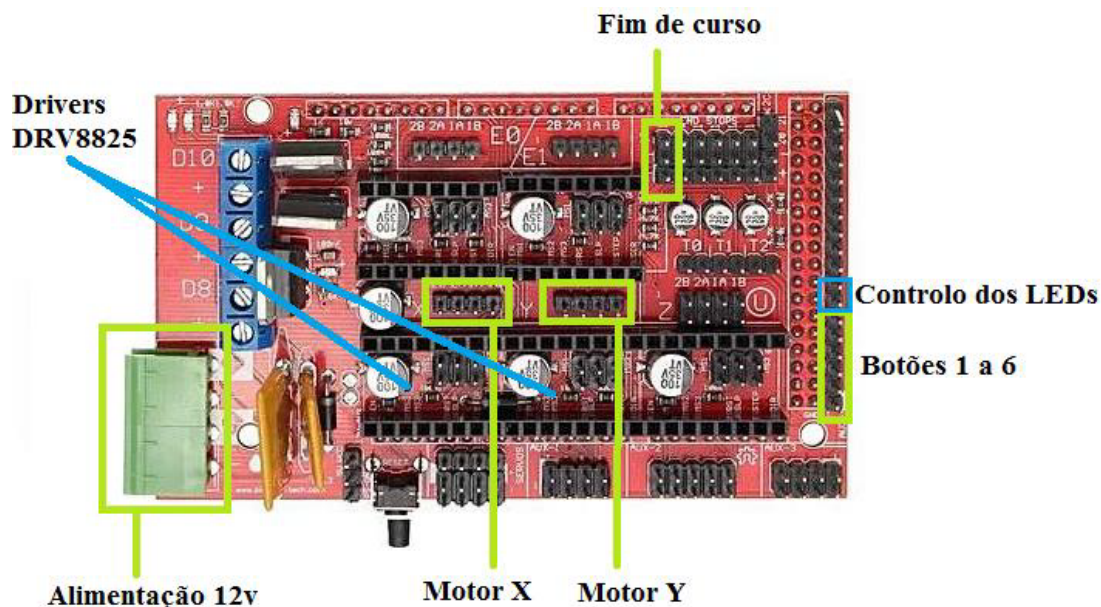


Figura 3.31: Esquema de montagem dos componentes electrónicos à RAMPS 1.4.

3.5.3 Drivers dos motores

Os *drivers* de uso mais comum, e com maior compatibilidade com a RAMPS 1.4 são os modelos A4988 e DRV8825. As principais diferenças em termos práticos é que o DRV8825 tem uma corrente máxima suportada perto dos 2.2 A, quanto que o A4988 fica abaixo dos 2A. Segundo as características dos motores escolhido, o Nema23 possui uma corrente típica por fase de 2A, pelo que força a escolha a ser o DRV8825. Além disso, este *driver* permite fazer o controle de *microstep* até 1/32, ao contrário do A4988 (em [58] está o *datasheet* do *driver* DRV8825).

Antes de se montar o *driver* na placa, é preciso primeiro fazer-se um teste, e ajustar o valor de tensão de referência do *driver* (V_{ref}) para limitar a corrente disponível para o motor, evitando mau funcionamento e possíveis danos. Este procedimento é feito através da montagem de um circuito de teste, utilizando uma *breadboard*. Nesse circuito, são feitas as ligações mínimas para o funcionamento do *driver*, alimentado por um lado com os 24V que são necessários para o motor, e por outro ligando uma fonte lógica de alimentação (5V vindos do *Arduino*), segundo as ligações da fig. 3.32 [59].

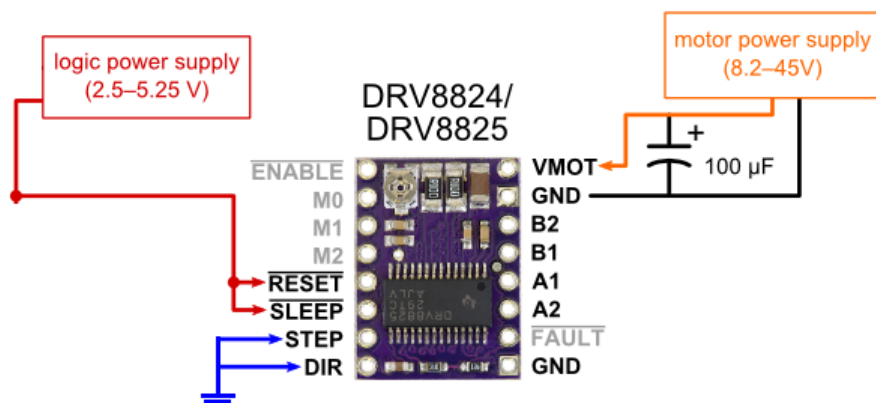


Figura 3.32: Circuito de teste e limitação de corrente (I_{\max}) do *driver*.

passo seguinte é medir a V_{ref} , utilizando um multímetro entre o pino de ligação à terra (asinalado como *GND* na fig. 3.32) e o parafuso de ajuste existente na parte de cima do *driver*. Este parafuso é também utilizado para o ajuste da V_{ref} , rodando-o com cuidado. O valor que se procura medir depende do valor da *Rated Current* de cada motor, disponibilizado nos *datasheets*, e é calculado utilizando a fórmula simples de:

$$\text{Limite de Corrente} = V_{\text{ref}} \times 2 \quad (3.5)$$

Em que o Limite de Corrente é o valor da *Rated Current* do motor que se quer regular.

Nos casos dos motores escolhidos, para valores de corrente limite de 1,33A e 2A obtêm-se os valores de V_{ref} de 0.67V e 1V (Nema17 e Nema23, respectivamente). Depois de ajustado devidamente cada *driver* para o seu motor, podem então ser montados na placa RAMPS.

3.5.4 Fim de curso

Como já foi falado no projecto mecânico, foi prevista a instalação de um fim de curso para o motor 2, para que se pudesse encontrar uma posição central para a estrutura, e daí se poder correctamente rodar os motores para as posições relativas às vistas típicas do objecto. Este fim de curso foi montado como *Normally Closed* (NC), por ser uma boa prática de segurança: caso haja uma falha no circuito ou no fim de curso, o sistema não arranca. O fim de curso obtido, cedido pelo INEGI, utiliza alimentação de 12V, sendo apenas necessário ligar os contactos NC e COM (Comum) nos pinos reservados para o efeito, no RAMPS.

3.5.5 Alimentação do sistema Eléctrico

Tendo em conta os dados dos dois motores e o material disponível no INEGI, escolheu-se uma fonte de alimentação com 12V pois, mesmo não sendo a tensão mais recomendada para o motor Nema23, a utilização de 12V apenas tem consequências no valor da velocidade máxima e no binário a altas rotações (diminuem ambos), e neste caso os motores não vão necessitar de grandes velocidades de rotação, podendo-se utilizar este valor de tensão. Os 12V também vão servir para alimentar o fim-de-curso mecânico que foi montado no sistema. Em termos de corrente, os motores foram programados para que não haja movimentação dos dois ao mesmo tempo, pelo que se prepara o circuito para alimentar o motor que mais corrente necessita (Nema23 a 2A) com uma margem adicional por causa do consumo de corrente quando os motores estão parados. O valor escolhido foi então 4A para o sistema de motores, placa e *drivers*.

Como foi visto anteriormente, foram construídas soluções de iluminação para esta aplicação, que utilizam fitas de LEDs. Estes funcionam com uma tensão de 5V, e para um cálculo do mínimo de corrente utiliza-se o valor que está no *datasheet* [54] para um LED único, 50mA. O caso do anel é o que tem maior número de LEDs, 36, por isso uma estimativa aponta para os 1,8A de corrente necessária. Como as diferentes técnicas de iluminação não são utilizadas em simultâneo, também neste caso não é preciso considerar o caso em que as duas fitas estão ligadas, sendo sempre ligadas à vez, controladas por software.

Na tentativa de arranjar uma solução para conseguir tanto os 12V para os motores como os 5v para as luzes, foi fornecida uma fonte de alimentação da *Mean Well*, modelo RD-85A. Como é possível ver no *datasheet* presente em [60], esta fonte tem dois canais de saída, um com 12V e 4A e outro que pode ser ajustável para 5V e até 8A. Ligando então a fitas de LEDs aos 5V, o RAMPS 1.4 e o fim-de-curso aos 12V, permite satisfazer as necessidades energéticas do sistema.

A alimentação da câmara, que também faz parte deste sistema electrónico, é tratada de maneira diferente. Visto que durante o seu funcionamento esta está sempre conectada a um computador pessoal portátil por USB, este tipo de comunicação encarrega-se de fazer a alimentação devida da câmara.

3.5.6 Circuito Eléctrico

No final da montagem de todos os componentes eléctricos, o circuito final do sistema ficou semelhante ao do circuito esquematizado na fig. 3.33. Neste esquema não está representada a placa de controlo RAMPS 1.4, por isso fez-se a ligação dos componentes aos pinos respectivos do Arduino; mas é possível compreender as ligações eléctricas tanto em termos de alimentação (12V e 5V, dependendo do componente) e as ligações para as entradas e saídas do sistema. As fitas de LED estão esquematizadas como pequenas linhas de LEDs (à direita na fig. 3.33), em cima delas está uma pequena *switch* que representa o fim de curso que foi montado na estrutura.

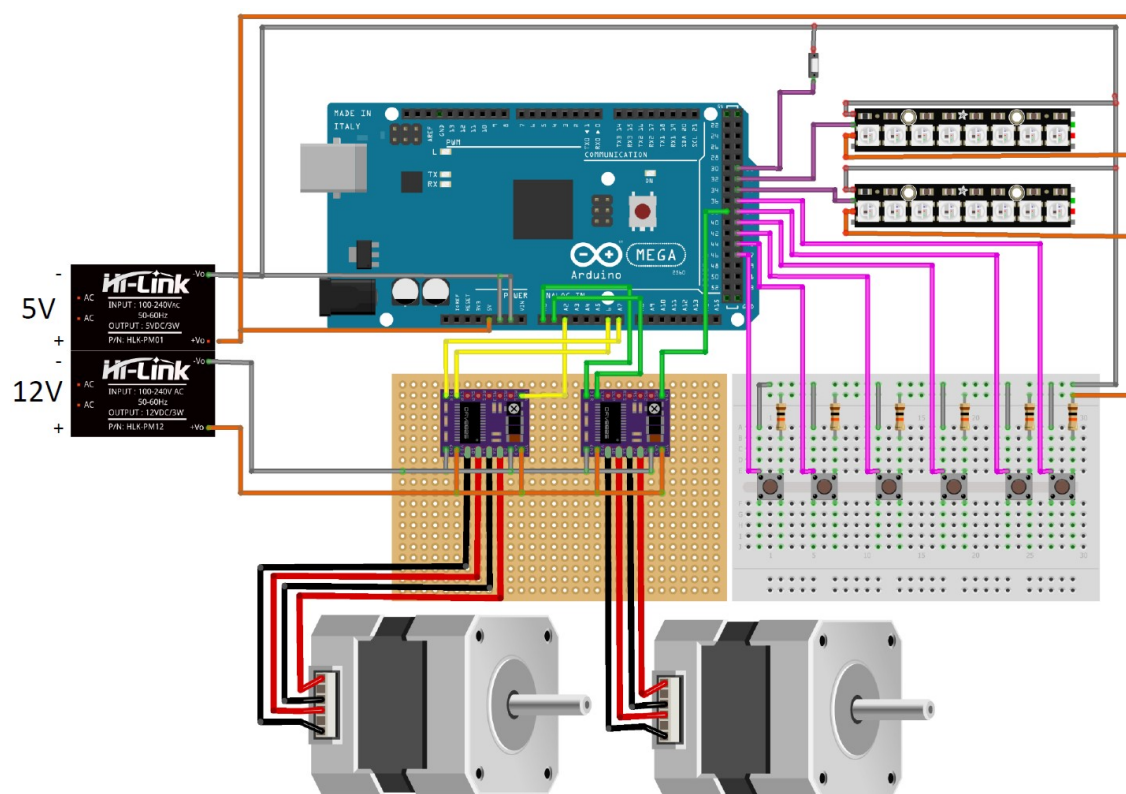


Figura 3.33: Esquema eléctrico do sistema completo.

3.5.7 Programação do sistema electromecânico

Têm sido feitas até aqui inúmeras considerações para que seja possível a visualização de todas as faces da peça a estudar, e grande parte delas parte do princípio que é feito um programa que permite a movimentação e rotação da peça através de motores. No Anexo I está o programa completo, sendo que aqui serão explicadas os principais pontos.

O programa realizado permite fazer as seguintes tarefas:

- Controlo da rotação dos motores;
- Mudança de estados de iluminação;
- Inicialização e diagnóstico inicial da iluminação;
- Procura do fim de curso para alinhar o motor 2;
- Utilização de vários botões para efectuar diferentes tarefas.

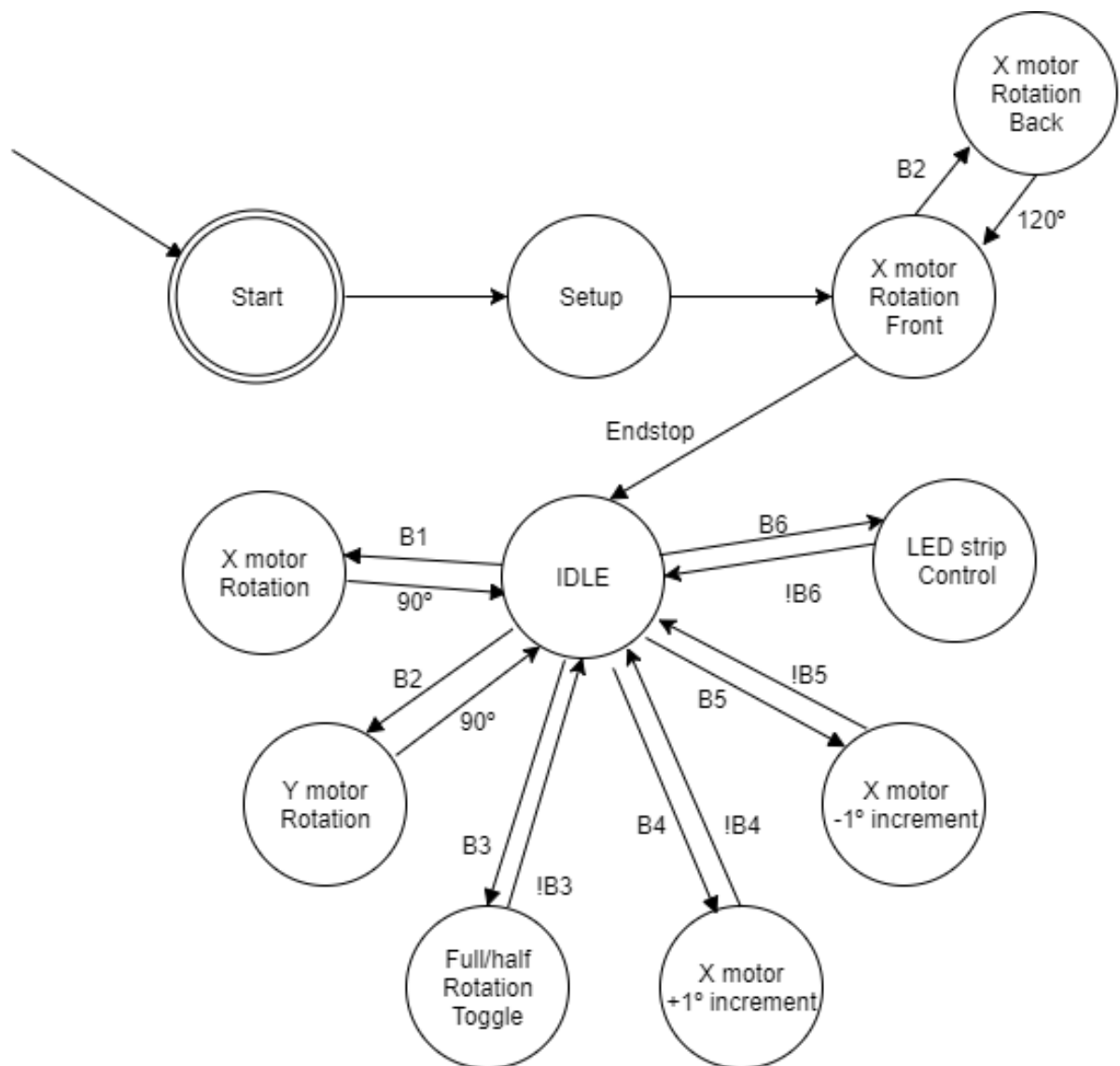


Figura 3.34: Diagrama do funcionamento do *Arduino*, vista geral.

3.5.7.1 Rotação dos motores

O modo de funcionamento dos motores utilizando estes *drivers* e a RAMPS, segundo os seus respectivos *datasheets* (no caso de [57], na RAMPS existe um exemplo de comando), consiste no envio um impulso para o *driver* com o sinal lógico HIGH seguido de um impulso com sinal lógico LOW, após um certo *delay*. Este procedimento faz lembrar o de um PWM, pois o *delay* que se escolhe para acontecer entre o pulso HIGH e LOW é que vai definir a velocidade de rotação. Quanto mais pequeno o *delay*, mais rápido roda o motor, até um valor mínimo suportado pelo motor.

Para que o motor rode continuamente os passos pretendidos, define-se primeiro o valor para o *delay* desejado, o número de passos a avançar e o sentido. Depois cria-se um ciclo para que sejam continuamente a ser enviados pulsos HIGH e LOW, com o sentido e *delay* pretendidos, na

duração do número de passos definidos. Um exemplo de movimentação do motor 1 durante um certo número de passos, com um determinado *delay*, num sentido arbitrário é:

Código 3.1: Código de exemplo de movimentação de um motor, em linguagem Arduino

```

1  for (int n=0; n <= steps; n++) {
2      digitalWrite(Y_DIR_PIN    , HIGH);
3      digitalWrite(Y_STEP_PIN   , HIGH);
4      delayMicroseconds(delay);
5      digitalWrite(Y_STEP_PIN   , LOW);
6  }
```

3.5.7.2 Iluminação

Visto serem fitas de LEDs do modelo *neopixel*, estas utilizam *libraries* fornecidas pelo fabricante para o seu funcionamento. Depois de ser definido o pino a que estão ligadas e o número de LEDs que a fita comporta, é declarado um objecto *neopixel*, com dados anteriormente fornecidos. Nota para o facto das fitas serem de modelos diferentes: uma tem as cores básicas (RGB) apenas, a outra possui além das básicas um LED de cor branca (RGBW).

Código 3.2: Utilização da library *Neopixel* para inicialização das fitas de LED

```

1 Adafruit_NeoPixel strip1 = Adafruit_NeoPixel (NUMPIXELS1,
        PIN_LED_RING, NEO_GRB + NEO_KHZ800);
2 Adafruit_NeoPixel strip2 = Adafruit_NeoPixel (NUMPIXELS2,
        PIN_LED_DOME, NEO_GRBW + NEO_KHZ800);
```

Para fornecer energia a todos os LEDs da fita, e para que a fita seja acesa consoante solicitação, é criada uma função para cada fita “setStripColorX”. Esta função serve para definir a cor para cada LED, para o número de LEDs que a fita tiver.

Código 3.3: Utilização da library *Neopixel* para inicialização das fitas de LED

```

1 void setStripColor1(int r, int g, int b) {
2     for(int i=0; i<NUMPIXELS1; i++) {
3         strip1.setPixelColor(i, strip1.Color(r,g,b));
4         delay(5);
5     }
6     strip1.show();
7 }
```

As fitas são depois inicializada dentro da rotina de *setup*, utilizando a seguinte função:

Código 3.4: Utilização da library *Neopixel* para inicialização das fitas de LED

```
1 strip1.begin();
2 strip1.show();
3 strip2.begin();
4 strip2.show();
```

e é feito um pequeno diagnóstico, fazendo acender e apagar as fitas, alternadamente, utilizando a função “setStripColor”

Código 3.5: Diagnóstico de funcionamento das fitas de LED

```
1 setStripColor1(255,255,255);
2 delay(200);
3 setStripColor1(0,0,0);
4 delay(200);
5 setStripColor2(255,255,255,255);
6 delay(200);
7 setStripColor2(0,0,0,0);
8 delay(1000);
```

3.5.7.3 Procura do fim de curso

Ainda dentro do *setup*, após o diagnóstico da iluminação, é feito o motor 2 rodar apenas numa direcção até actuar o fim de curso (e sair do ciclo). No caso do fim de curso se encontrar no sentido oposto, há a possibilidade apenas e só durante o *setup* de carregar no botão que roda o motor 2 para que este faça 60° no sentido contrário, voltando depois a rodar no sentido em que estava, em busca do fim-de-curso. Esta não é uma solução ideal, porque se assume que o operador da estrutura está sempre junto a esta. No entanto, como não existe posição de “descanso” do sistema, foi uma maneira que se escolheu para se conseguir encontrar a referência de posição. Concluído este ciclo, força-se a espera de 2 segundos, para haver tempo de soltar o botão que pudesse ter sido actuado no diagnóstico e assim não movimentar o sistema despropositadamente.

Código 3.6: Rotina inicial de procura do fim de curso

```
1
2 while (!digitalRead(Y_ENDSTOP_PIN)) {
3     if (!digitalRead(buttonY)) {
4         for (int n=0; n <= teststeps; n++) {
5             digitalWrite(Y_DIR_PIN, HIGH);
```



```
6    digitalWrite(Y_STEP_PIN    , HIGH);
7    delayMicroseconds(test_speed);
8    digitalWrite(Y_STEP_PIN    , LOW);
9    }
10   }
11   else{
12       digitalWrite (Y_DIR_PIN, LOW);
13       digitalWrite (Y_STEP_PIN, HIGH);
14       delayMicroseconds(test_speed);
15       digitalWrite (Y_STEP_PIN, LOW);
16   }
17 }
18 delay(2000);
```

3.5.7.4 Botões utilizados e suas funções

Ao todo, foram montados 6 botões com as seguintes funcionalidades:

1. Rodar o motor 1 o número de passos equivalente a uma rotação de 90°;
2. Rodar o motor 2 para que se consigam as vista de cima e baixo da peça;
3. Alterna o número de a utilizar para as rotações dos motores entre o valor normal e a sua metade;
4. Avanço do motor 1 uma pequena quantidade de passos, num sentido;
5. Avanço do motor 1 uma pequena quantidade de passos, no sentido oposto;
6. Liga e desliga as fitas de LEDs, alternadamente.

A lógica utilizada no funcionamento destes botões foi o uso de caixas de estados para quase todos, que são alterados cada vez que o botão respectivo é pressionado. No caso do primeiro botão, este simplesmente faz o motor 1 movimentar-se 1600 passos (90°) sempre na mesma direcção. Como há espaço para que a peça rode 360°, a peça acaba por voltar ao estado inicial após ter dado uma volta completa, permitindo seja utilizado apenas um ciclo que é activo quando o botão é carregado.

Já para o segundo botão, é necessário haver diferentes estados que significam diferentes posições da estrutura. Carregando uma vez, o botão faz com que o motor 2 rode num sentido (inclinando a sub-estrutura interior para trás) até fazer os 90°, permitindo assim a vista de baixo do objecto. A segunda vez que é carregado faz voltar o motor à posição inicial. Uma terceira vez provoca a rotação no sentido oposto ao do primeiro caso, até perfazer os 90° também. Por último, carregando a quarta vez faz voltar o motor à posição inicial e a caixa de estados ao estado inicial.

O terceiro botão surgiu pela necessidade que houve de se terem vistas intermédias da peça, na fase dos testes. Este botão apenas alterna o facto dos botões 1 e 2 fazerem rodar os motores o número de passos explicado acima ou metade desse valor. Assim, é possível haver ainda mais vistas possíveis dos objectos a estudar.

O quarto e quinto botão servem para se fazer um ajuste fino do motor 1. Como não há fim de curso para este motor, a solução pensada para ajustar o alinhamento da peça foi este. Além disso, permite rodar a peça em pequenos ângulos, caso seja necessário por causa de iluminação ou câmara.

O sexto e último botão do programa tem a função de comandar as fitas de LEDs. Utiliza 4 estados diferentes, que variam ao carregar no botão. A sequência de estados é: luzes desligadas, Domo ligado, luzes desligadas novamente, Anel *Dark Field* ligado, e repete.

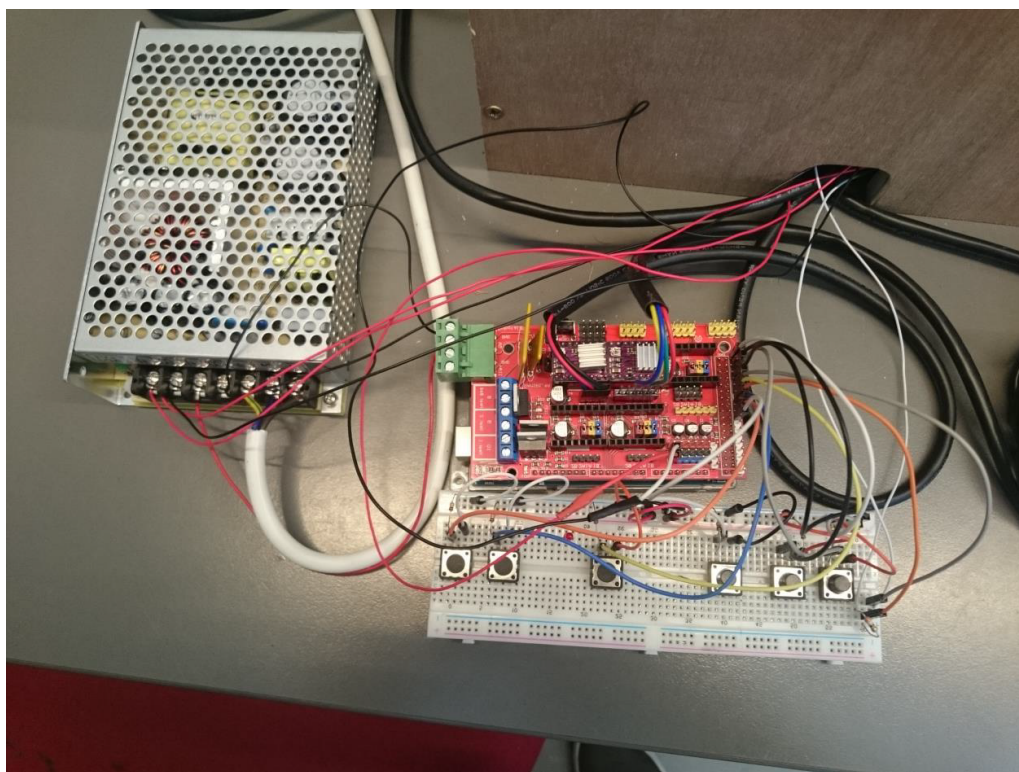


Figura 3.35: Disposição da parte electrónica principal: arduino+RAMPS 1.4 (ao centro, vermelho), juntamente com os botões (em baixo) e a fonte (em cima, à esquerda).

3.5.8 Funcionamento da câmara

A câmara, parte integrante do sistema desde a sua génese entra também nesta secção da electrónica, onde vai ser explicado a programação feita para o seu uso.

3.5.8.1 Escolha da linguagem de programação a utilizar

Um dos critérios de selecção da câmara foi já o tipo de programação que é possível e em que linguagem. Neste caso, o fabricante do sensor disponibiliza variada documentação para as linguagens de Matlab e C++, sendo que para *python* existem apenas exemplos de aplicação. No entanto, foi criado uma implementação oficial das funções da API da câmara em *python*. A escolha da linguagem viria a recair mesmo em *python*, por motivos de tempo de aprendizagem, recursos de aprendizagem da linguagem, e porque era a linguagem na qual conseguia ter mais apoio da parte do INEGI, onde foi desenvolvido o software.

3.5.8.2 Script de funcionamento da câmara

A compreensão de como se programa este tipo de câmaras começou no exemplo cedido pelo fabricante, que permitia obter imagens em tempo real vindas da câmara. No entanto, pelo menos para efeitos deste trabalho, é mais interessante a captura de *frames* únicas, com a possibilidade de controlar os parâmetros que a câmara oferece, tais como tempo de exposição, *gamma*, etc.

Ainda que seja um programa simples, permite alterar as condições necessárias da câmara, efectuando a captura de forma eficaz (programa completo no Anexo J).

O programa estrutura-se da seguinte maneira: a câmara é inicializada, depois são designados os parâmetros que a câmara irá utilizar, e no final faz-se a captura de uma única *frame* e guarda-se a imagem. O *flowchart* da fig. 3.36 explica de maneira simples este funcionamento.

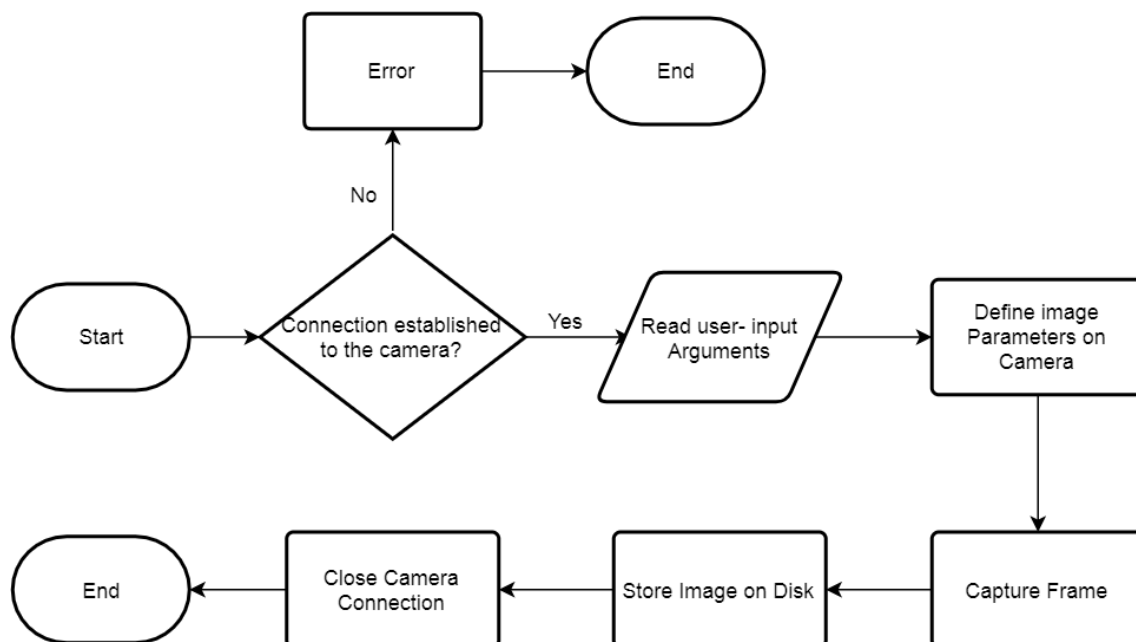


Figura 3.36: *Flowchart* do funcionamento de câmara.

Como é utilizado um *wrapper* para ter acesso às funções da câmara em *python*, o primeiro passo é importar essas mesmas funções e declarar as variáveis necessárias de maneira a que possam ser interpretadas pelas funções em C++.

Código 3.7: Importação do *wrapper* para a câmara, em *Python*

```
from pyueye import ueye

pccmem = ueye.c_mem_p()
memID = ueye.c_int()
hWnd = ctypes.c_voidp()
```

O primeiro passo em termos de programa é então a inicialização da câmara, obtendo um ID do dispositivo (guardado em “hcam”) e executando a função “is_InitCamera”. Caso a comunicação com a câmara não consiga ser estabelecida, o programa devolve uma mensagem de erro indicando o caso, e termina.

Código 3.8: Detecção da câmara

```
hcam = ueye.HIDS(0)
nret = ueye.is_InitCamera(hcam, hWnd)

if (nret==0):
    print ('Camera found')
else:
    print ('Camera disconnected or in use')
exit()
```

Depois de iniciada a comunicação com a câmara, recolhem-se informações sobre o sensor e aloca-se memória para imagem a capturar. Passa-se então à definição dos parâmetros da fotografia a capturar, sendo que estes parâmetros foram divididos em duas categorias: os que se quiseram fixos, e os que se queriam variar nos testes.

Dentro dos parâmetros fixos está o parâmetro das FPS. A maneira como a câmara está programada internamente faz com que, a partir do momento em que a comunicação entre o computador e a câmara é estabelecida (a câmara fica “aberta”), exista uma reserva da largura de banda da comunicação por USB. Como a câmara utiliza USB até à versão 3.0, mas o portátil disponível apenas tem até à versão 2.0 (características no Anexo D e na tabela 3.1, respectivamente), a frequência máxima de captura de imagens é limitada à largura de banda disponível. Este valor de frequência é inversamente proporcional ao valor do tempo de exposição do sensor. Por isso, e visto que o interesse deste trabalho não é a filmagem das peças, reduz-se o valor de FPS para 2, utilizando a função “is_SetFrameRate”, aumentando assim os valores do tempo de exposição, que são mais relevantes. Outro parâmetro que permanece fixo durante a captura de imagens é a resolução da imagem e a posição do sensor utilizada para captura, que se querem ambos no máximo (Resolução de 2056x1542 e captura de imagem a partir do ponto (0,0)). Para estes parâmetros fica então escrito:

Código 3.9: Definição dos parâmetros fixos de imagem

```

fps = 2
ueye.is_SetFrameRate(hcam, ueye.c_int(fps), ueye.c_double(fps))

aoi_x = 0
aoi_y = 0
aoi_width = 2056
aoi_height = 1542
aoi_params = ueye.IS_RECT()
aoi_params.s32X = aoi_x
aoi_params.s32Y = aoi_y
aoi_params.s32Width = aoi_width
aoi_params.s32Height = aoi_height
nret = ueye.is_AOI(hcam, ueye.IS_AOI_IMAGE_SET_AOI, aoi_params, ueye.sizeof(
    aoi_params))

```

Os parâmetros variáveis referem-se aqueles parâmetros que serão alterados durante a fase de testes, consoante o método e a necessidade. É o caso do tempo de exposição, do ganho do sensor e do *gamma*. Para estes parâmetros foram adicionadas funções para que pudessem ser utilizados como argumentos, ao correr o programa. Assim, sempre que se quer alterar um destes três parâmetros, basta correr o *script* adicionando a letra relativa ao parâmetro a alterar, seguido do valor: –e no caso da exposição, medido em milissegundos; –G para o ganho, entre 0 e 100%; –g para o valor de *gamma*, que é medido numa escala de 0 a 1000. São aplicados valores por defeito, caso não seja fornecido nada pelo utilizador, e quando o *script* é corrido são comunicados os valores utilizados na captura de imagem. Este método requer o uso da *library* “argparse”.

Código 3.10: Definição dos argumentos disponíveis para variar os parâmetros da câmara

```

parse=argparse.ArgumentParser()
parse.add_argument("-e", "--exposure", required=False, help="exposure time in ms
    , max. value depends on the FPS")
parse.add_argument("-G", "--gain", required=False, help="gain value (0–100%),
    default 0")
parse.add_argument("-g", "--gamma", required=False, help="gamma value (0–1000),
    default value 100 = 1.0 gamma")
args=vars(parse.parse_args())

if ((args["exposure"]==None):
    exposure = ueye.c_double(0)
else:
    exposure = ueye.c_double(float(args["exposure"]))
nret = ueye.is_Exposure(hcam, ueye.IS_EXPOSURE_CMD_SET_EXPOSURE, exposure, 8)
exposure_print = round(exposure,1)
print 'exposure time =', exposure_print, 'ms'

if ((args["gamma"]==None):

```

```

        gamma = ueye.c_int(100)
    else:
        gamma = ueye.c_int(int(args["gamma"]))
    nret = ueye.is_Gamma(hcam, ueye.IS_GAMMA_CMD_SET, gamma, ueye.sizeof(gamma))
    gamma_val = round(float(gamma)/100,1)
    print 'gamma =', gamma_val

    if ((args["gain"])==None):
        gain = ueye.c_int(0)
    else:
        gain = ueye.c_int(int(args["gain"]))
    nret = ueye.is_SetHardwareGain(hcam, gain, ueye.IS_IGNORE_PARAMETER, ueye.
        IS_IGNORE_PARAMETER, ueye.IS_IGNORE_PARAMETER)
    print 'master gain =', gain, '%'

```

O passo seguinte é a captura de uma *frame*, utilizando a função “is_FreezeVideo”, seguida da sua gravação. Aqui também é possível alterar alguns parâmetros fixos tais como o nome, o formato e a qualidade do ficheiro gravado.

Código 3.11: Declaração dos parâmetros e gravação da imagem no disco rígido do computador

```

nret = ueye.is_FreezeVideo(hcam, ueye.IS_WAIT)
FileParams = ueye.IMAGE_FILE_PARAMS()
FileParams.pwchFileName = ("_output.png" %exposure_print)
FileParams.nFileType = ueye.IS_IMG_PNG
FileParams.nQuality = 100
FileParams.ppcImageMem = None
FileParams.pnImageID = None

nret = ueye.is_ImageFile(hcam, ueye.IS_IMAGE_FILE_CMD_SAVE, FileParams, ueye.
    sizeof(FileParams))

if (nret==0):
    print ('Image Saved')
else:
    print ('Error')

```

Por fim, a memória da câmara é liberta e a comunicação fechada.

Código 3.12: Importação do *wrapper* para a câmara, em *Python*

```

ueye.is_FreeImageMem(hcam, pccmem, memID)
ueye.is_ExitCamera(hcam)

```

3.6 Conclusão

Neste capítulo foi então projectado todo o sistema de Visão Artificial, que irá ser utilizado nos testes posteriormente realizados. Tendo em conta as condições do problema inicial, e utilizando os conceitos teóricos estudados anteriormente, foram dados vários passos até à construção de um sistema final que inclui: estrutura completa que permite segurar e rodar a amostra a fotografar, suporte de câmara ajustável, algumas soluções de iluminação customizadas, circuito electrónico para controlo, com botões para interface com o sistema. Foi também feita a programação de todos os componentes electrónicos que assim o necessitaram.

Capítulo 4

Teste experimental e discussão de resultados

Este trabalho tem duas partes distintas: o projecto e a produção de um sistema electromecânico que permitisse ser utilizado em testes para Visão Artificial; e o estudo feito a puxadores de alumínio, utilizando o sistema produzido, para detectar os defeitos neles presentes. Neste capítulo será tratado o método de teste efectuado, bem como a apreciação dos resultados conseguidos como consequência do trabalho desenvolvido. Inicialmente será feita uma explicação do estudo feito e o seu método, depois serão mostrados os principais resultados, o processamento feito de maneira a tentar detectar defeitos e por fim a discussão.

4.1 Estudo da aplicação da Visão Artificial efectuado às amostras fornecidas

4.1.1 Metodologia de teste

Depois de ser projectado e construído o sistema de testes, este foi utilizado numa tentativa de conseguir encontrar os defeitos das peças do qual o projecto partiu, validando assim os conhecimentos adquiridos com resultados favoráveis à detecção dos defeitos.

A metodologia de teste teve as seguintes fases:

- Ajuste do posicionamento da câmara em relação ao objecto;
- Calibração da câmara;
- Estabelecimento de *setups* de iluminação a utilizar;
- Escolha dos parâmetros da câmara a variar;
- Preparação das peças a testar;
- Obtenção de imagens para cada *setup*, variando os parâmetros da câmara;
- Escolha das imagens com melhor contraste;

- Aplicação de técnicas de tratamento de imagem.

4.1.1.1 Ajuste do posicionamento da câmara

Como ponto de partida para este teste, é posicionada a câmara de maneira a cumprir os requisitos do projecto. Isto inclui a distância que fica o sensor do objecto e o alinhamento horizontal e vertical da câmara em relação ao centro do objecto. A distância entre a peça e o plano do sensor foi já assunto de tratamento em capítulos anteriores: como é um dos parâmetros definidos pelo controlo de qualidade feito na empresa, a câmara ficará a 250 mm da face do puxador que for testado. Os alinhamentos horizontal e vertical interessam para manter a câmara o mais centrada possível, em relação à peça. O horizontal foi sendo feito na fase de montagem, mas o vertical terá que ser ajustado. Foi então ajustada a distância entre a câmara e a face do objecto para a requerida, e a altura da câmara para que a imagem ficasse centrada, resultando no seguinte esquema (fig. 4.1):

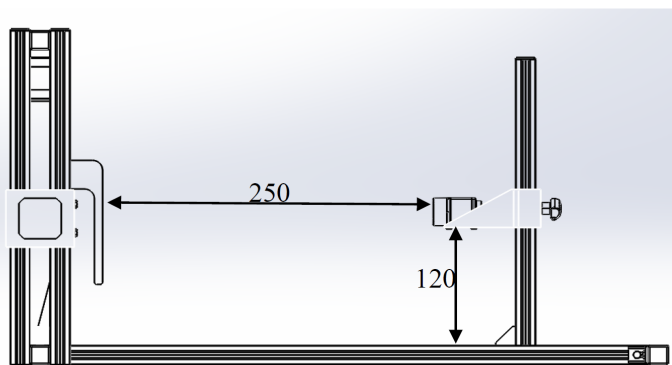


Figura 4.1: Esquema com as medidas utilizadas no ajuste de posicionamento da câmara (WD = 250, H = 120,).

4.1.1.2 Calibração da câmara

Para se configurar correctamente o foco da câmara, foi utilizada uma *Siemens Star* semelhante à da fig. 4.2. Esta imagem serve como dispositivo de calibração e teste de altas resoluções. Ao apontar a câmara para o seu centro, procura-se focar de maneira a ser visível o maior número de linhas no centro. Foram feitas diversas tentativas de calibração, para se conseguir ter um valor médio e conseguir uma aproximação razoável de uma óptica bem calibrada.

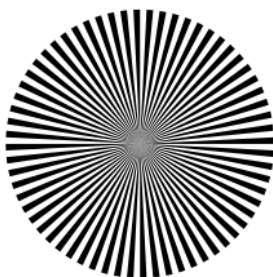


Figura 4.2: Exemplo de uma Siemens Star.

4.1.1.3 Setups de iluminação a utilizar

Com o intuito de tornar o teste o mais extensivo possível, não foram descartados nenhuma técnicas de iluminação, partindo do princípio que eram possíveis de reproduzir com o material existente e no sistema construído. É certo que foram feitos já testes anteriores para tentar determinar quais as melhores técnicas para experimentar, foram feitos de maneira demasiado grosseira para se desconsiderar qualquer *setup* de iluminação disponível. No limite, os testes iniciais serviram para que fossem construídas mais duas soluções, a juntar ao leque das já existentes.

Para a realização deste teste, pode-se contar uma vez mais com a Infaimon, que muito gentilmente cedeu duas fontes de iluminação. Uma foi um pequeno domo de luz vermelha e outra foi uma barra de LEDs *Effilux EFFI-FLEX-15-000-SD-P1*. O Domo emprestado é uma versão pequena da peça que foi construída por impressão 3D anteriormente. Ainda foi testado e comparado com os resultados do Domo maior já existente, mas além de não dar resultados diferentes, as suas pequenas dimensões significam que o círculo de luz formado pela difusão é demasiado reduzido e apenas cobre uma parte da face da peça a estudar. Por estes motivos, uso do Domo emprestado acabou por ser descartado.

No entanto, a barra de LED permitiu o uso de técnicas adicionais. Tal como é descrito no *datasheet* presente em [61], esta barra possui uma fila de 15 LEDs de alta intensidade, com uma lente semi-difusa de altura ajustável. O facto de ser semi-difusa, já se sabe que ajuda na redução do brilho nas faces da peça. A altura ajustável da lente faz com que seja possível escolher entre um dos três ângulos de emissão possíveis, com o ângulo menor a chegar aos 10° . Deste modo, consegue-se ter um efeito de iluminação quase direcciona, que trás vantagens e novas possibilidades. Teve que ser feita uma ligação eléctrica para que a barra funcionasse, e visto que esta é controlada através do valor de tensão que lhe é aplicado, foi preciso montar um potenciómetro para ligar/desligar a luz.

Devido às dimensões da barra, não foi possível fixá-la ao sistema mecânico, sendo apenas controlado as distâncias e o ângulo em relação ao objecto a iluminar. O que se fez em termos de *setups* foi pensar nos cenários que a barra seria mais vantajosa e adicioná-los aos já existentes. Por isso, as configurações luminosas utilizadas foram as seguintes:

- Iluminação Directa semi-difusa, de ângulo alto ($>45^\circ$);
- Iluminação Directa semi-difusa, de ângulo baixo ($<45^\circ$);
- Iluminação Tangencial;
- Iluminação *Backlight*;
- Iluminação utilizando um Domo;
- Iluminação recorrendo a um *Dark Field Ring*.

Iluminação Directa semi-difusa, de ângulo alto ($>45^\circ$): Utilizando a barra de LEDs junto à câmara, com a direcção de incidência quase perpendicular ao plano da face, tal como mostrado nas fotografias da fig. 4.3



(a)

Figura 4.3: Disposição utilizada para a iluminação directa de ângulo alto.

Iluminação Directa semi-difusa, de ângulo baixo ($<45^\circ$): Continuando na barra de LEDs, desta vez com um ângulo de 30° , abaixo do que se considera a fronteira entre *dark field* e *bright field*. O *setup* é mostrado na fig. 4.4



(a)

(b)

Figura 4.4: Disposição utilizada para a iluminação directa de ângulo baixo: **a)** vista lateral; **b)** vista de cima.

Iluminação Tangencial: Aqui foram utilizadas disposições para o lado direito e esquerdo da peça, de maneira simétrica. O objectivo é atingir o ângulo de incidência de quase 0° , tal como se pode ver na fig. 4.5

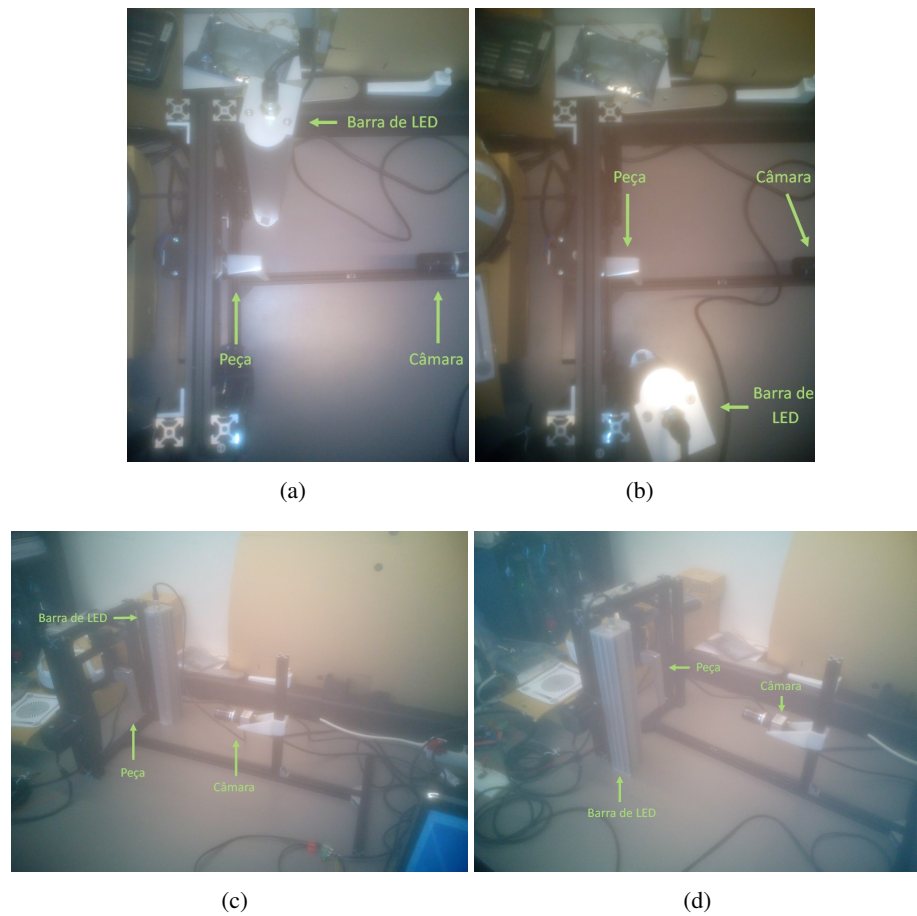


Figura 4.5: Disposições utilizadas para a iluminação tangencial: **a)** e **b)** vista de cima; **c)** e **d)** vista lateral.

Iluminação *Backlight*: Por ter propriedades de difusão da luz, foi utilizado este *setup* em que a barra está na parte de trás da peça, disposto como se vê na fig. 4.6

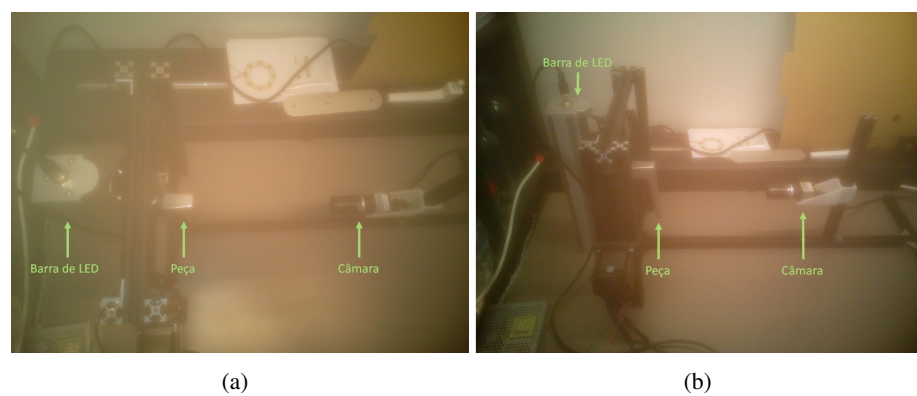


Figura 4.6: Disposição utilizada para a iluminação *Backlight*.

Iluminação utilizando um Domo: Pegando na peça construída para este efeito, coloca-se o Domo entre a câmara e a peça, montado no perfil que se encontra na parte inferior da estrutura. O domo tem que estar a alguma distância da peça para que o efeito da luz difusa seja aplicado, tal como se verifica na fig. 4.7.



Figura 4.7: Disposição utilizada para a iluminação com Domo.

Iluminação recorrendo a um *Dark Field Ring*: A posição do anel em relação à peça tem que ser tal que a configuração do baixo ângulo de incidência juntamente com a pouca luz incidida provoque o efeito de *Dark Field*. Das várias tentativas para um bom posicionamento chegou-se à conclusão que o ideal será a parede exterior do anel ficar entre 2 a 5 mm do plano da superfície da peça., tal como mostrado na fig. 4.8.

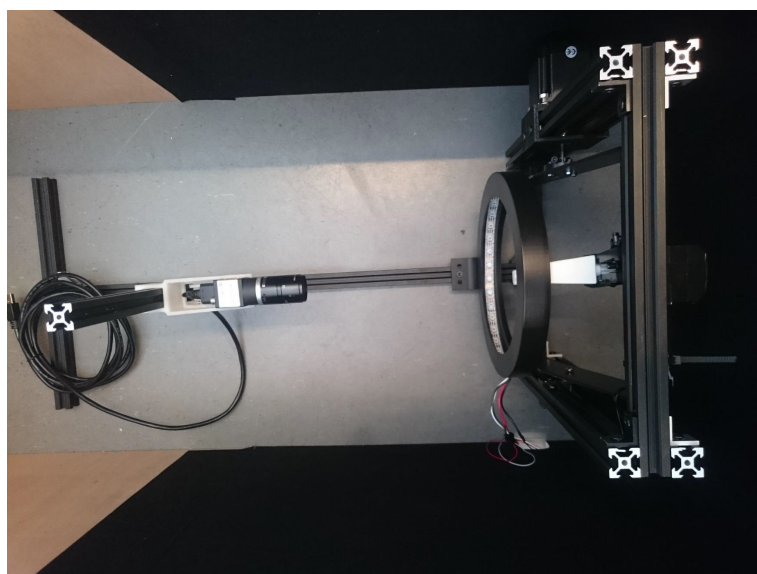


Figura 4.8: Disposição utilizada para a iluminação *Dark Field Ring*.

4.1.1.4 Parâmetros da câmara a variar

Como já foi explicado no capítulo da programação da câmara, os principais parâmetros que se querem controlar são o ganho do sensor, o *gamma* da imagem e o tempo de exposição do sensor à luz. Destes três, tanto a *gamma* como o ganho são processamentos feitos à imagem original, enquanto que o tempo de exposição altera efectivamente a fotografia capturada. Por isso, os testes vão ser feitos com principal incidência na alteração do tempo de exposição. Para os vários *setups* disponíveis, faz-se variar principalmente o tempo de exposição do sensor. Esta variação não é linear, nem igual para todas as configurações. Quando expostas a condições de iluminação diferentes, as faces da peça reagem de maneira diferente. A variação do tempo de exposição será feita adaptada a cada caso, procurando obter um leque de imagens com uma grande variedade de tempos de exposição para todos os *setups*.

4.1.1.5 Preparação das amostras a testar

As peças antes de serem testadas estão guardadas numa caixa de cartão, de maneira a não embaterem umas com as outras e provocarem novos defeitos. No entanto, ganham algum pó na superfície que é detectado nas técnicas de iluminação de baixo ângulo. Portanto limpam-se as peças antes de ser feito o teste.

Outro tipo de preparação que é feito é saber quais os defeitos presentes na peça e em que faces. Como este teste é para verificar a detectibilidade dos defeitos e quais os *setups* ideais, saber o que se procura pode facilitar, por exemplo, na variação do parâmetro do tempo de exposição.

4.1.1.6 Obtenção de imagens

Após as peças serem preparadas e montadas no sistema, e com o *setup* de iluminação montado, todo o sistema é devidamente tapado utilizando a caixa de madeira falada anteriormente. Liga-se a iluminação pretendida e corre-se o *script python* criado, utilizando os argumentos para variar os parâmetros da câmara. As imagens são depois devidamente identificadas com o número da peça, face estudada, tipo de *setup* em que foi capturada, valor de tempo de exposição escolhido.

4.1.1.7 Escolha das imagens mais adequadas

Este é um processo altamente qualitativo, que depende da acuidade visual de quem faz a escolha, entre outros factores. O que se pretende aqui é começar por eliminar as fotografias que sejam óbvios falhanços, seja por excesso/falta de luz, porque apareceram brilhos indesejados, que cubram parte ou mesmo toda a face, entre outros. Depois procura-se as fotografias que aparentemente pareçam ter melhor contraste entre defeitos e o resto da face, mais uma vez, de forma meramente subjectiva. No final fica-se com as melhores fotos de cada defeito para serem aplicados algoritmos de processamento de imagem.

4.1.1.8 Aplicação de técnicas de segmentação de imagem

A última fase do processo de teste, onde são submetidas as imagens escolhidas a algoritmos que permitam separar os defeitos do resto da imagem. Os algoritmos aplicados neste trabalho são os que fazem parte da *library* do OpenCV, por ser uma plataforma livre com poderosas ferramentas, poder ser utilizada com a linguagem de *python*, por haver bastante documentação *on-line* sobre o assunto e por causa dos conhecimentos disponível em [62,63]. Devido a restrições temporais, foram apenas aplicados métodos simples para a detecção de imagens, utilizando técnicas de segmentação à base de filtros de *Gauss/Laplace*, seguidos de *tresholding* simples ou adaptativo.

4.2 Validação do Sistema electromecânico de testes projectado

O resultado de todo o projecto feito foi um sistema físico, construído e montado nas instalações do INEGI. Neste caso, a validação que se pode fazer é que o produto do trabalho de uma parte desta dissertação funciona, e fá-lo dentro dos objectivos para o qual foi projectado. Só porque foi criado um sistema que cumpre aquilo a que se assegurou a fazer é que é possível que se faça um teste às condições de iluminação nas peças. Por isso, o facto de haver um teste de iluminação com resultados válidos demonstra que o projecto foi bem sucedido.

4.3 Aplicação das técnicas de iluminação

4.3.1 Resultado da aplicação das diferentes técnicas

Para melhor perceber as consequências do teste feito, na tabela 4.1 é descrita de forma sumária os resultados da aplicação de cada técnica em cada tipo de defeito. A avaliação é feita de forma meramente qualitativa, tendo como critérios a facilidade de distinção a olho nu, o contraste apresentado na imagem, e a facilidade de aplicação de técnicas de tratamento de imagem.

Tabela 4.1: Resumo dos resultados da utilização das diferentes técnicas de iluminação nas diferentes peças.

Peça/Defeito	Técnica	Resultado
1 - Riscos	Directa, ângulo alto	Mau resultado, não se distingue o defeito
	Directa, ângulo baixo	Pouco satisfatório, difícil de distinguir o defeito
	Tangencial	Satisfatório, possível de se distinguir o defeito
	<i>Backlight</i>	Mau resultado, não se distingue o defeito
	Domo	Resultado bom [Melhor resultado]
	<i>Dark Field Ring</i>	Satisfatório, possível de se distinguir o defeito
2 - Poros	Directa, ângulo alto	Resultado bom, possível de se distinguir o defeito
	Directa, ângulo baixo	Pouco satisfatório, difícil de distinguir o defeito
	Tangencial	Satisfatório, possível de se distinguir o defeito
	<i>Backlight</i>	Mau resultado, não se distingue o defeito
	Domo	Satisfatório, possível de se distinguir o defeito
	<i>Dark Field Ring</i>	Resultado bom [Melhor resultado]
3 - Linha de Separação	Directa, ângulo alto	Satisfatório, possível de se distinguir o defeito
	Directa, ângulo baixo	Resultado bom [Melhor resultado]
	Tangencial	Pouco satisfatório, difícil de distinguir o defeito
	<i>Backlight</i>	Mau resultado, não se distingue o defeito
	Domo	Pouco satisfatório, difícil de distinguir o defeito
	<i>Dark Field Ring</i>	Mau resultado, não se distingue o defeito
4 - Pancadas	Directa, ângulo alto	Pouco satisfatório, difícil de distinguir o defeito
	Directa, ângulo baixo	Satisfatório, possível de se distinguir o defeito
	Tangencial	Mau resultado, não se distingue o defeito
	<i>Backlight</i>	Mau resultado, não se distingue o defeito
	Domo	Satisfatório [Melhor resultado para a face de cima]
	<i>Dark Field Ring</i>	Bom [Melhor resultado para a face da frente]
5 - Rechupes	Directa, ângulo alto	Satisfatório, possível de se distinguir o defeito
	Directa, ângulo baixo	Resultado bom [Melhor resultado]
	Tangencial	Satisfatório, possível de se distinguir o defeito
	<i>Backlight</i>	Mau resultado, não se distingue o defeito
	Domo	Resultado bom, possível de se distinguir o defeito
	<i>Dark Field Ring</i>	Resultado bom, possível de se distinguir o defeito

4.3.2 Imagens obtidas pela câmara

Os testes de iluminação provaram ser eficazes, com todas as peças a conseguirem ter boas imagens dos seus defeitos. Visto serem imagens de resolução alta, foram cortadas de maneira a evidenciar apenas o defeito detectado. Como se pode ver na sequência de imagens, existe pelo menos um *setup* de iluminação que parece conseguir criar boas zonas de contraste, dado um certo defeito. Começando pelos riscos, presentes na peça 1, estes são melhor detectados utilizando a técnica do Domo (fig. 4.9). conseguem-se notar as riscas escuras que contrastam com o resto da face.

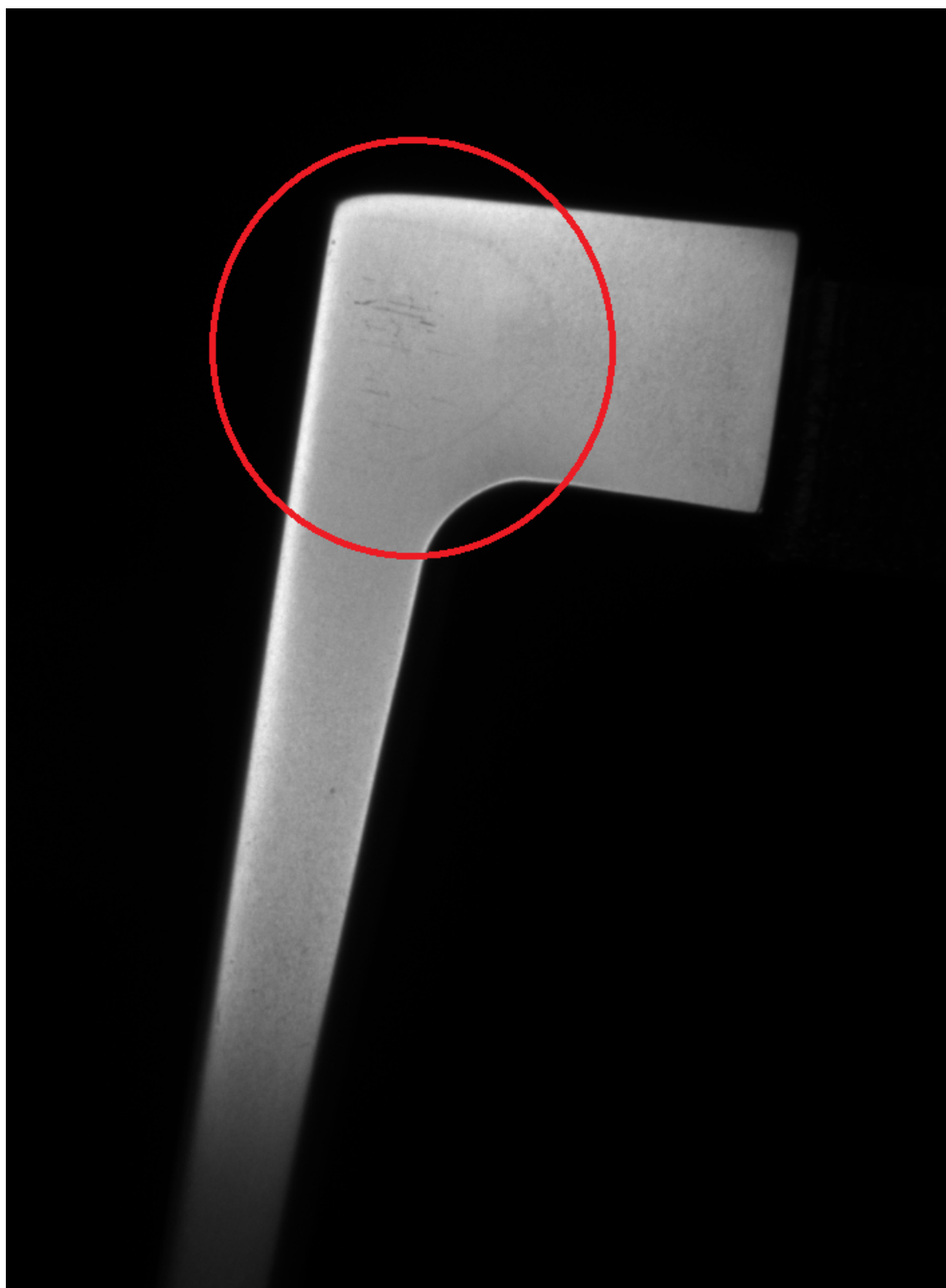


Figura 4.9: Resultado da peça 1, utilizando iluminação Domo (zona com defeitos assinalados com um círculo).

A peça 2 conseguiu detectar melhor os poros presentes com o *Dark Field Ring*, em que estes aparecem a cor branca, juntamente com as arestas e o resto da face a preto (fig. 4.10)

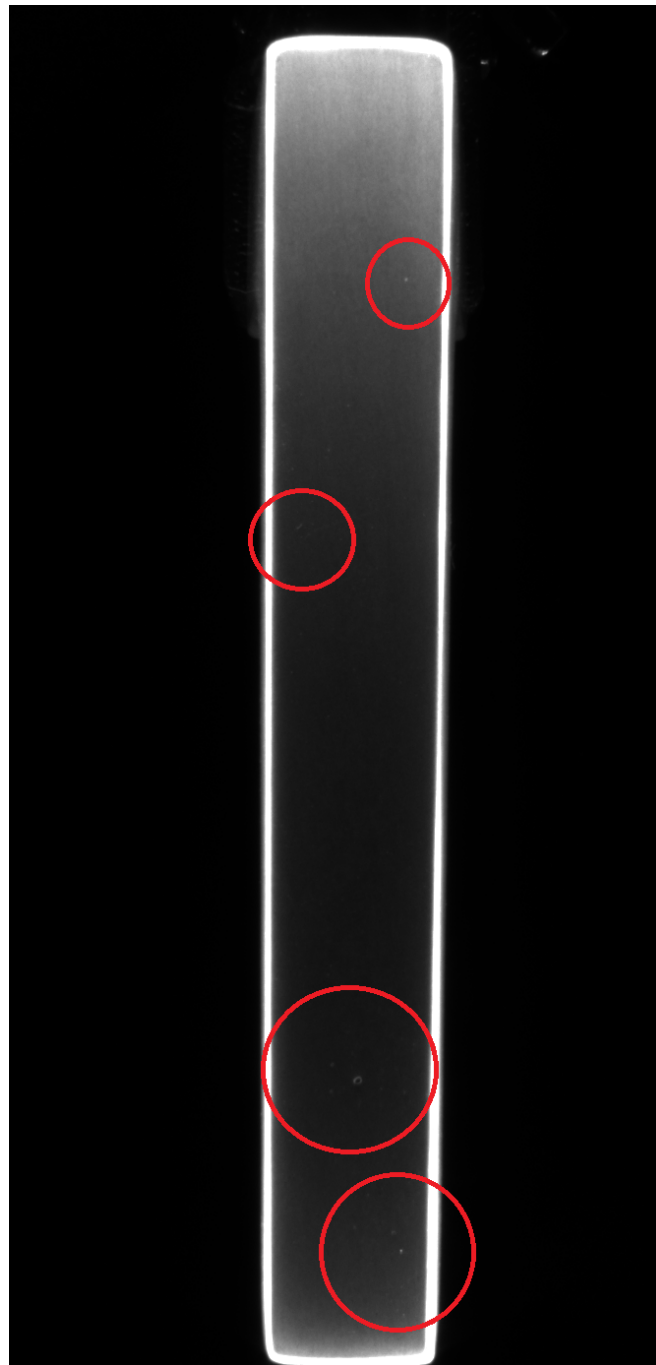


Figura 4.10: Resultado da peça 2, utilizando iluminação *Dark Field Ring* (zonas com defeitos assinalados com um círculo).

A linha de separação, na peça 3, é preferencialmente detectada por iluminação directa semi-difusa, de baixo ângulo. Ao conseguir a face toda uniformemente iluminada nota-se a falha que ocorre na aresta (fig. 4.11)

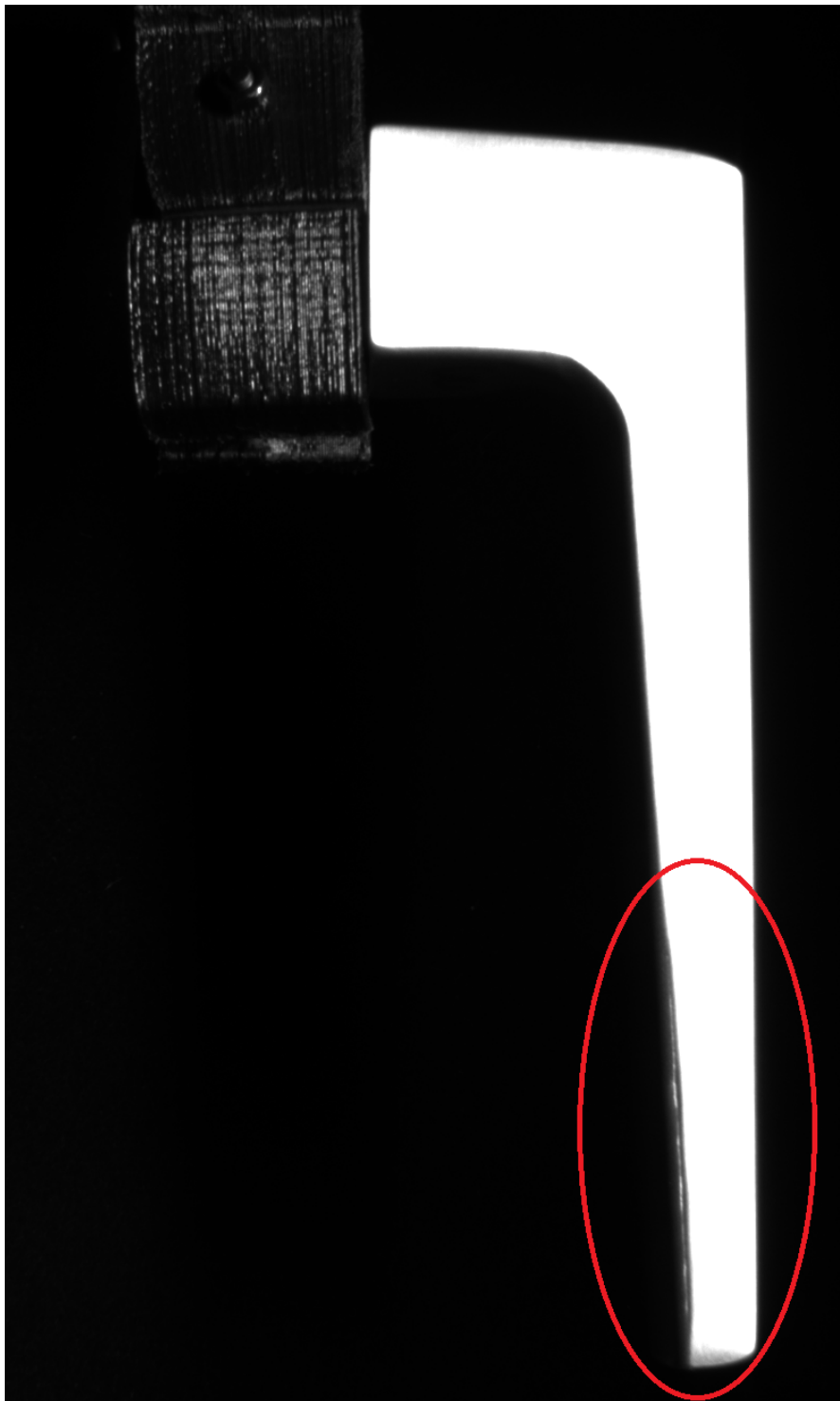


Figura 4.11: Resultado da peça 3, utilizando iluminação directa semi-difusa, de baixo ângulo (zona com defeitos assinalados com um círculo).

No caso da peça 4 (fig. 4.12), existem defeitos em mais do que uma face. Na aresta superior utilizou-se com sucesso o Domo, e na face frontal a técnica de *Dark Field Ring*.

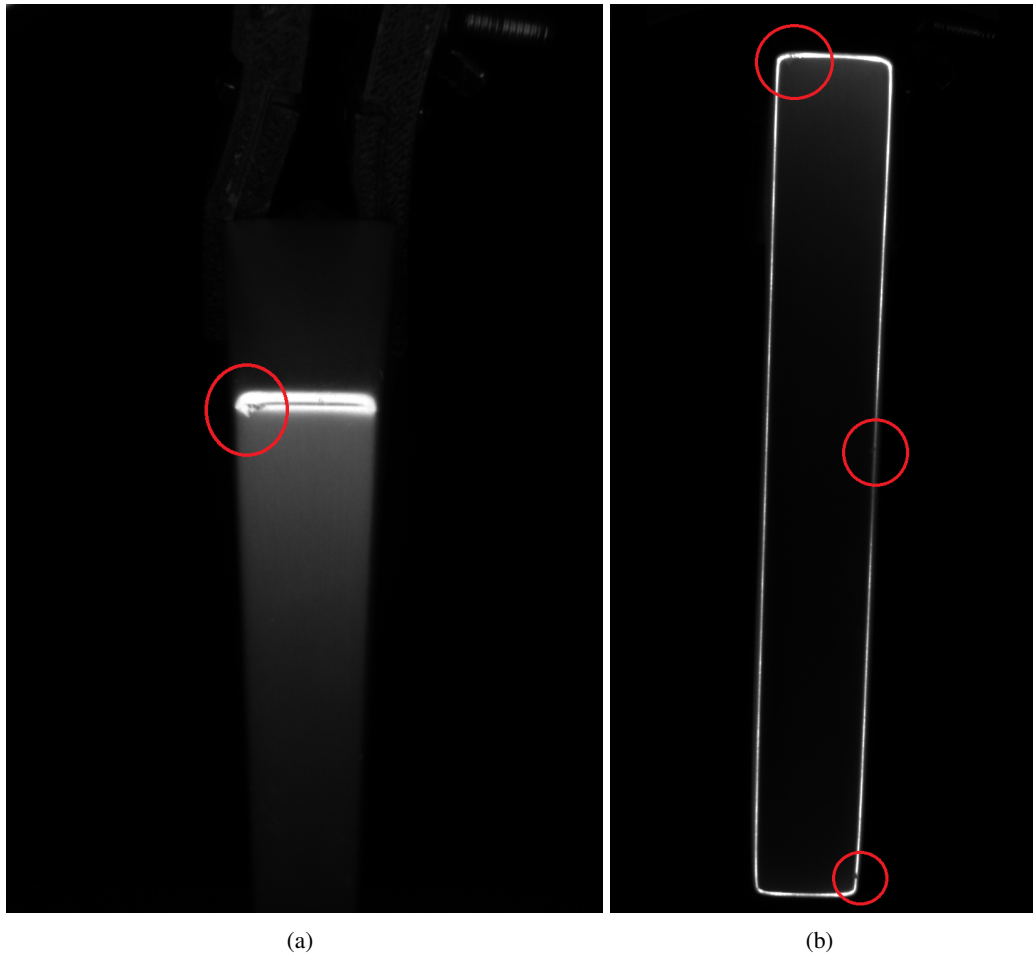


Figura 4.12: Resultado para os diferentes defeitos na peça 4 (zonas com defeitos assinalados com um círculo): **a)** utilizando a respectiva de Domo na face de cima; **b)** utilizando a técnica de *Dark Field Ring* na face da frente.

Para a peça 5 (fig. 4.13), foi utilizada iluminação directa semi-difusa, de baixo ângulo, com a peça rodada 45°.

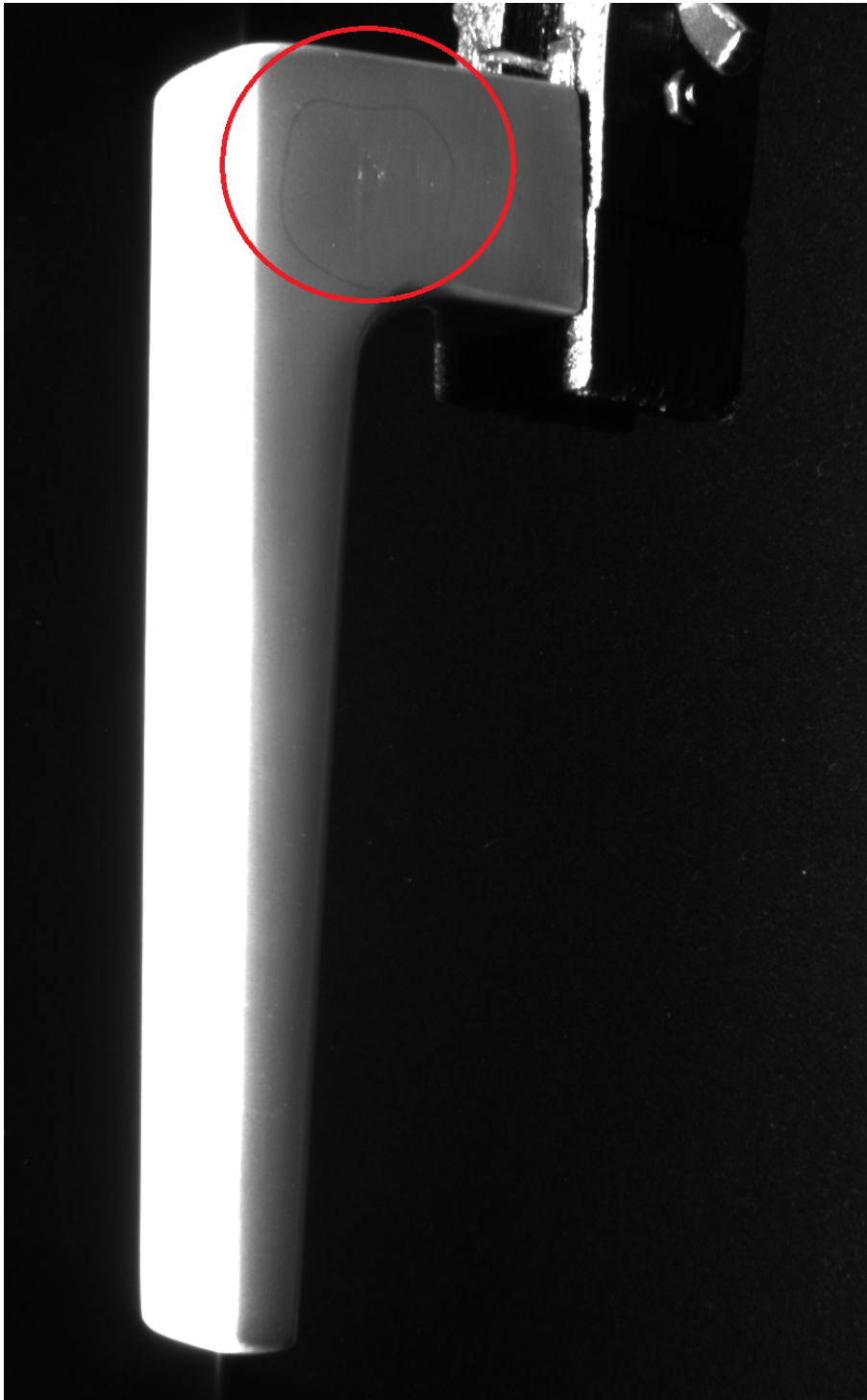


Figura 4.13: Resultado da peça 5, utilizando iluminação directa semi-difusa, de baixo ângulo (zona com defeitos assinalados com um círculo).

4.3.3 Técnicas com maior alcance

Apesar dos vários defeitos serem detectados por diferentes métodos de iluminação, existem algumas técnicas com maior alcance que outras, como é o caso do Domo (fig. 4.14) e do *Dark field Ring*(fig. 4.15) que realçam diferentes aspectos em diferentes peças. Já tinha sido visto no início do trabalho que estas técnicas seriam à partida indicadas para um maior número de defeitos, comprovado aqui com resultados.

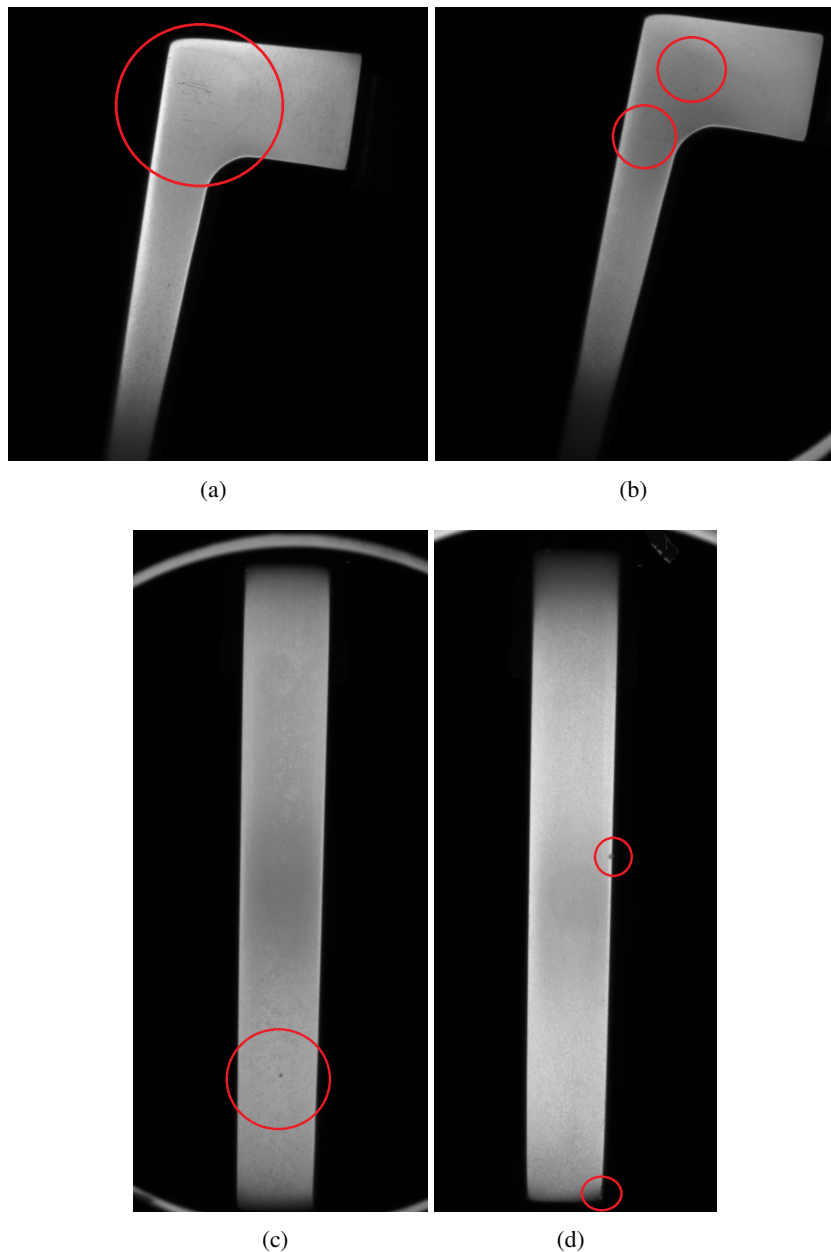


Figura 4.14: Utilização da técnica de iluminação de Domo em diferentes peças (zonas com defeitos assinalados com um círculo): **a)** face lateral da peça 1; **b)** face lateral da peça 2; **c)** face frontal da peça 2; **d)** face frontal da peça 4.

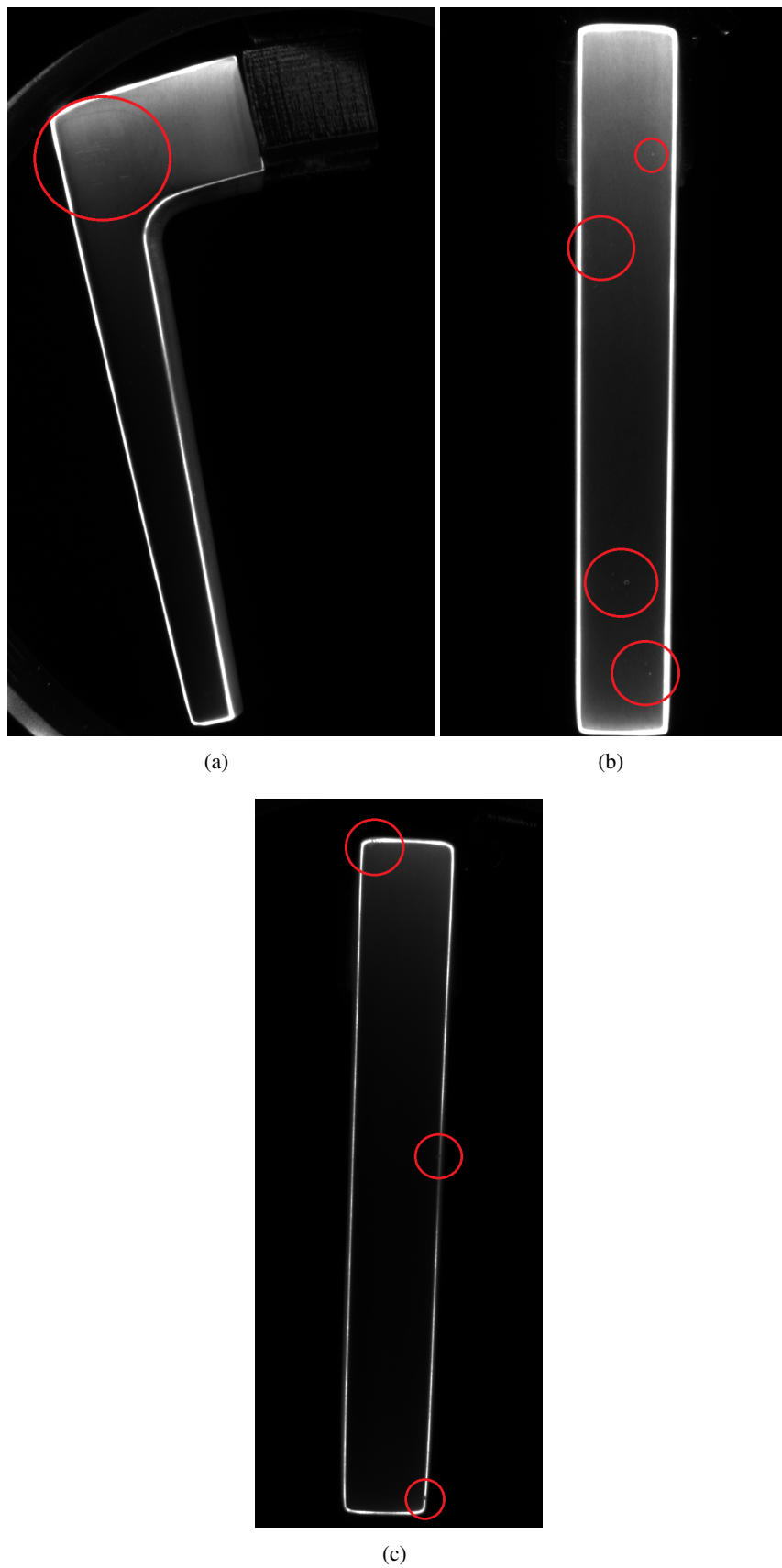


Figura 4.15: Utilização da técnica de iluminação de *Dark Field Ring* em diferentes peças (zonas com defeitos assinalados com um círculo): **a)** face lateral da peça 1; **b)** face frontal da peça 2; **c)** face frontal da peça 4.

4.3.4 Utilização de técnicas de processamento de imagem

As comparações feitas lado a lado nesta parte, permitem comparar o resultado da captura com o resultado do processamento para o caso de cada defeito. Foram utilizadas técnicas diferentes em defeitos diferentes, com o intuito de se obterem as imagens segmentadas para que possa afirmar com alguma confiança na possibilidade de detecção dos defeitos das peças.

A utilização de filtros de *Gauss/Laplace*, seguido de um *thresholding* adaptativo permite obter os riscos da peça 1.

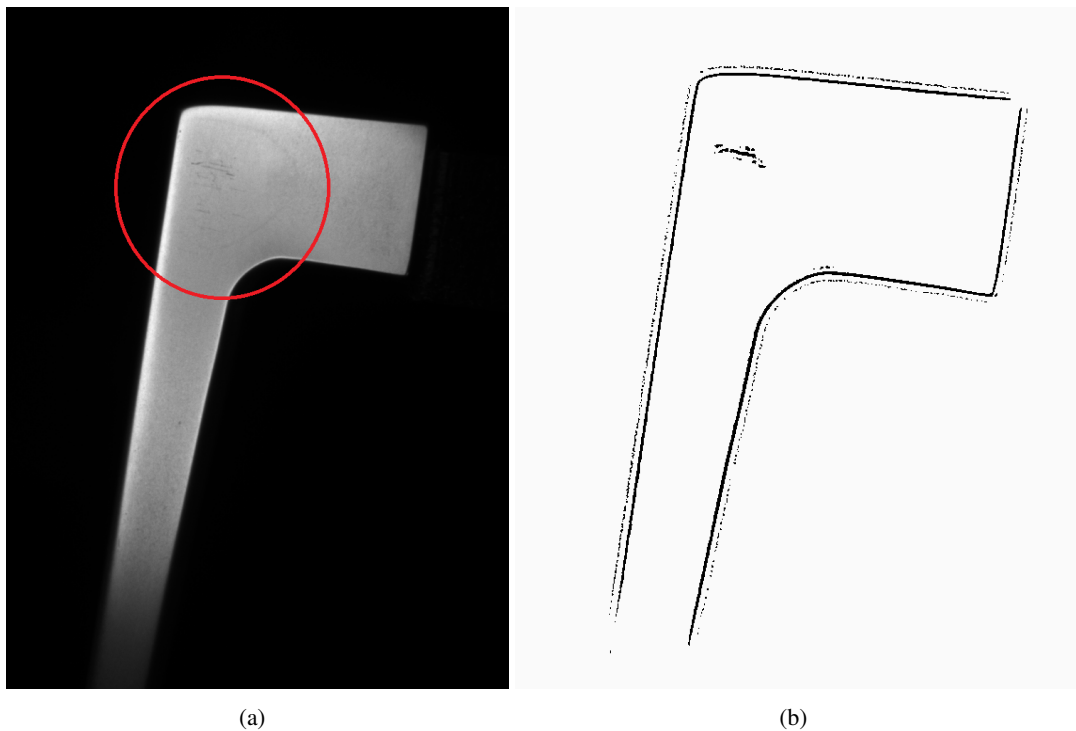


Figura 4.16: Comparação de imagens resultantes do processamento da face da peça 1.

No caso da peça 2 foi apenas aplicado um pequeno *Blur* à imagem, seguido de um *threshold* adaptativo. É possível notar os pontos brancos, relativos a poros na superfície da peça.

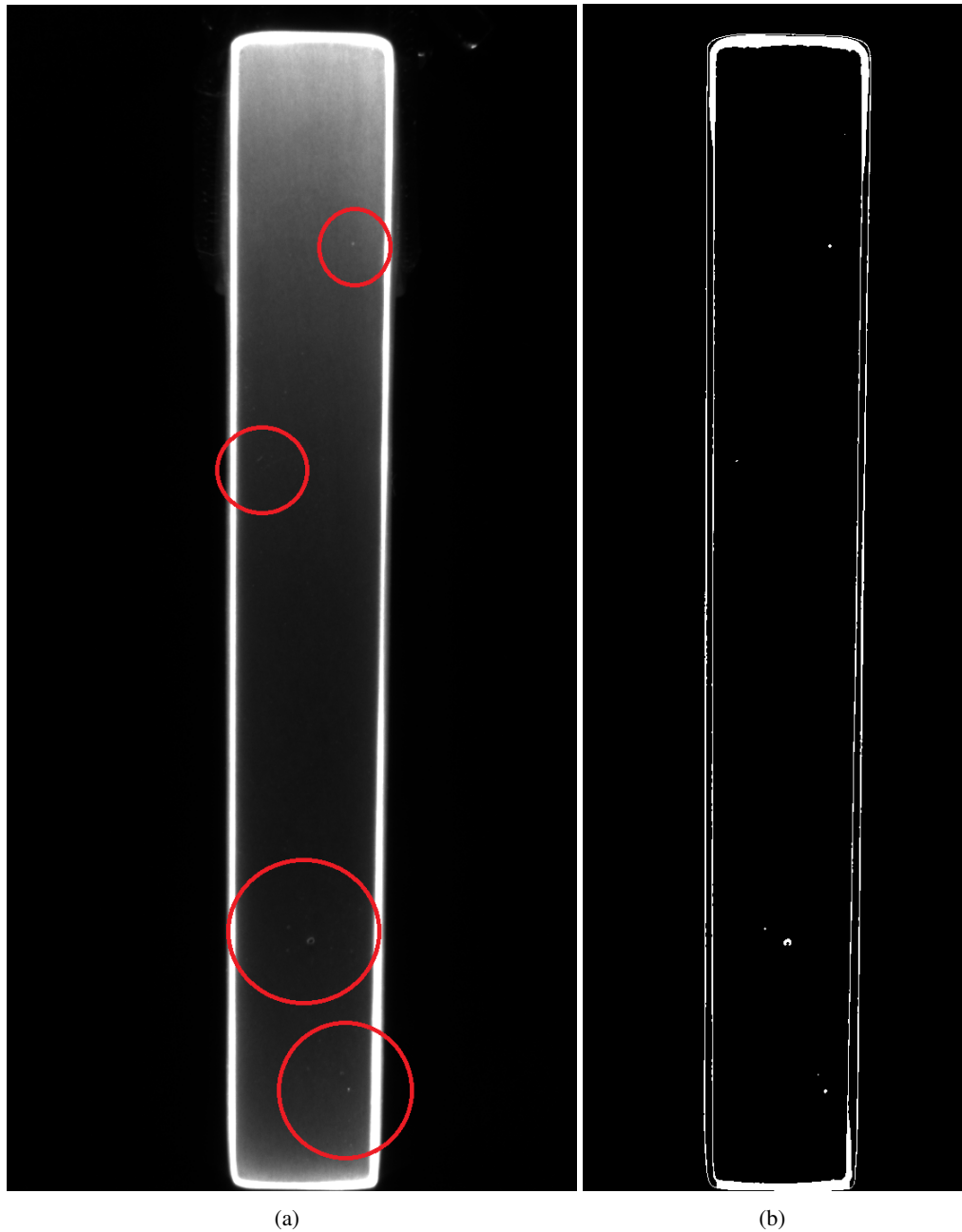
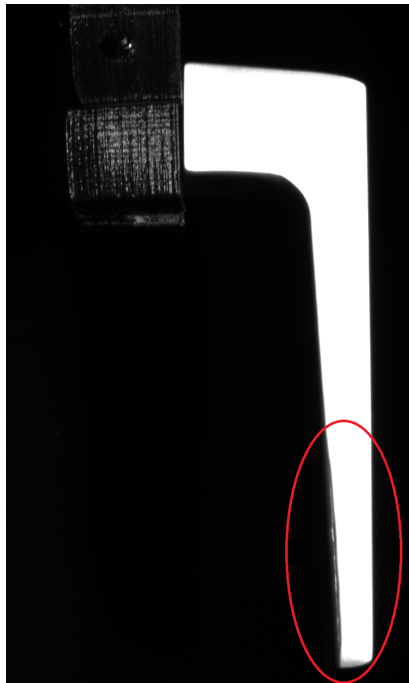
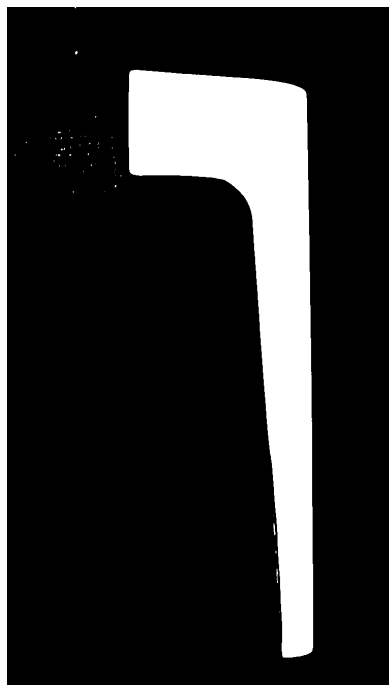


Figura 4.17: Comparação de imagens resultantes do processamento da face da peça 2.

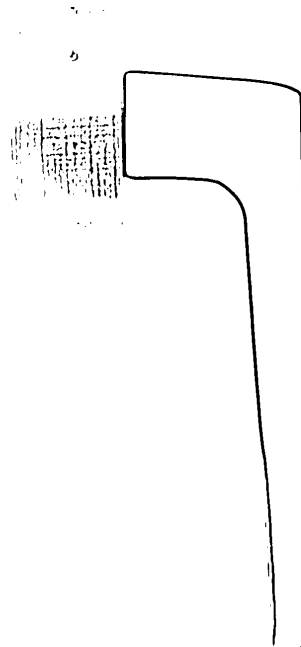
Para a peça 3 foi possível utilizar tanto um *thresholding* simples como um *thresholding* adaptativo. Enquanto que num se obtêm as arestas resultantes, no outro aparece a face com a geometria desfigurada.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.18: Comparação de imagens resultantes do processamento da face da peça 3: **a** original; **b**) *threshold* simples; **c**) *threshold* adaptativo

Para ambos os defeitos da peça 4, foi utilizada uma abordagem de semelhante à feita na peça 2, conseguindo resultados semelhantes.

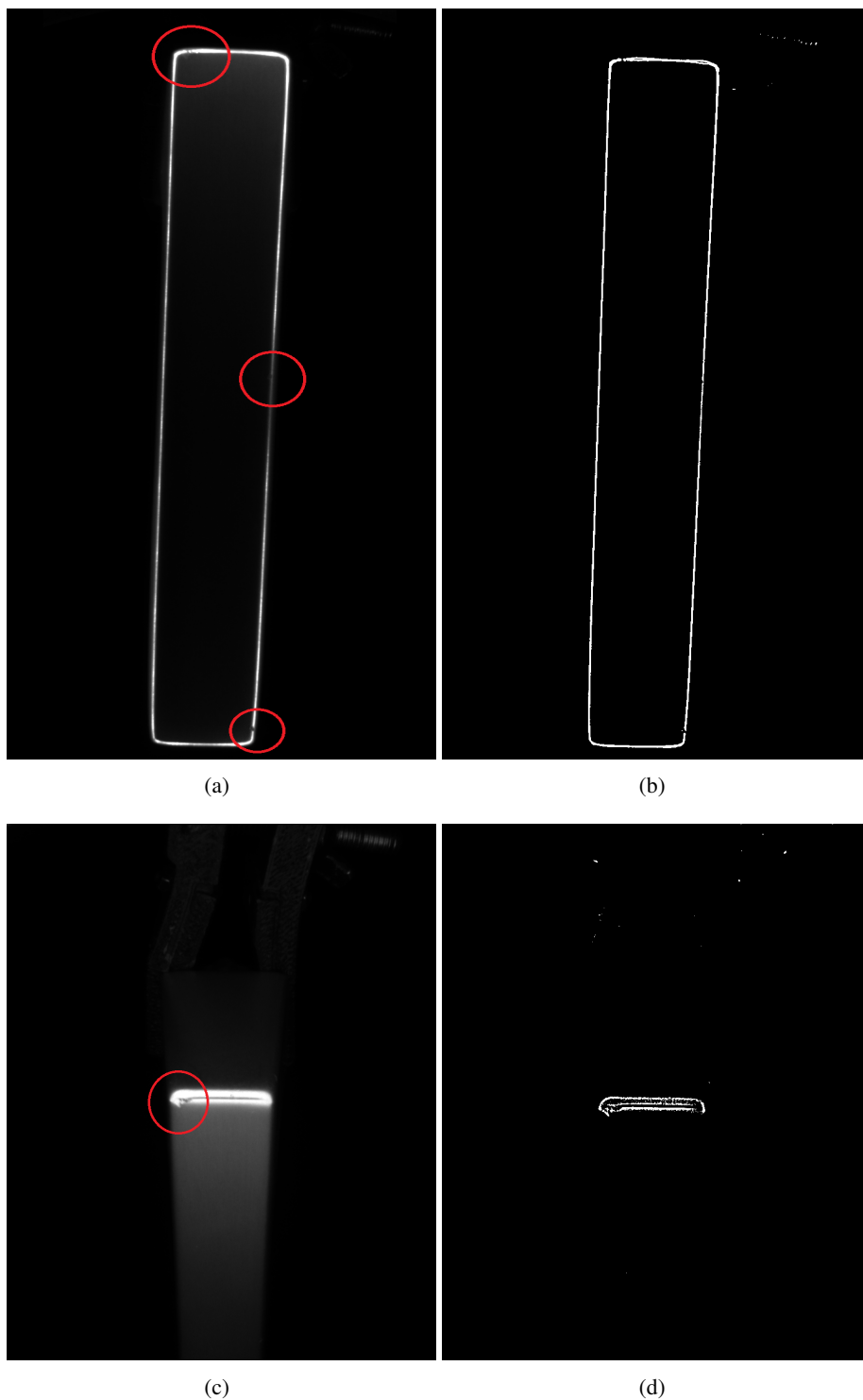


Figura 4.19: Comparação de imagens resultantes do processamento das faces da peça 4: **a)** e **c)** os originais; **b)** e **d)** após processamento

Finalmente, no caso da peça 5, foi feito um *threshold* adaptativo após um filtro de *Laplace* ao qual foi subtraída uma imagem que utilizou um *threshold* simples, de maneira a diminuir as interferências de fundo.

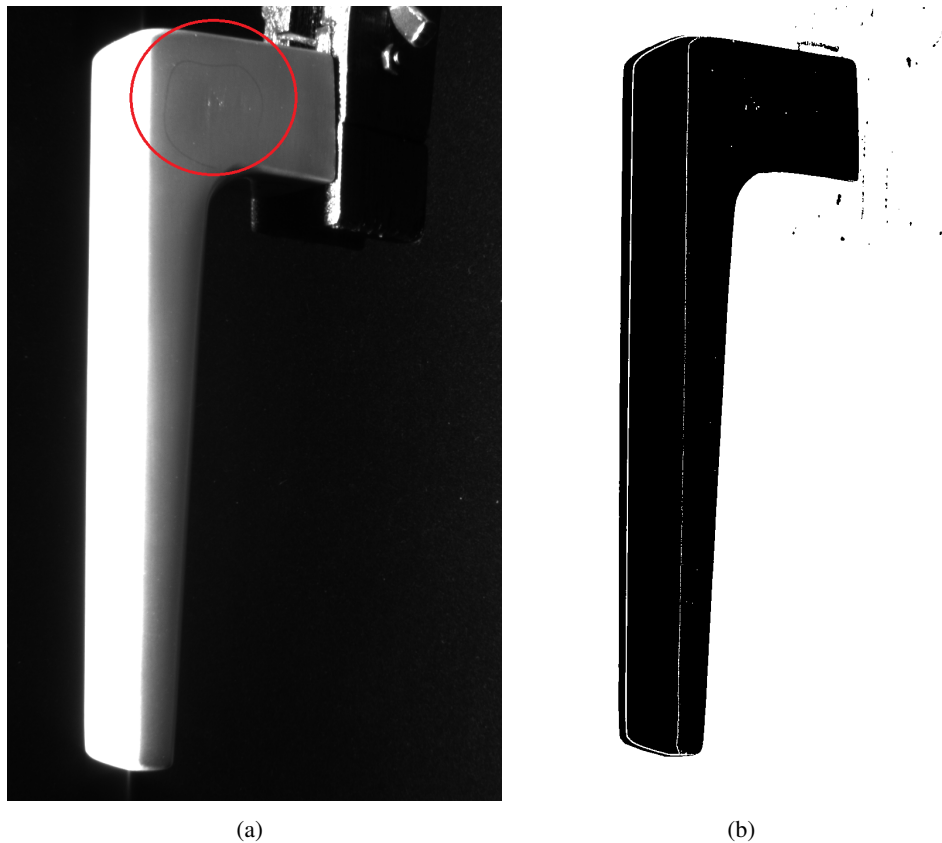


Figura 4.20: Comparação de imagens resultantes do processamento da face da peça 5: **a** original; **b**) após processamento

Estas imagens mostram claramente o contraste provocado pela existência de irregularidades. Por isso, e vendo estes resultados, acredita-se que seja possível a detecção destes defeitos, nestas condições. Desde os riscos da peça 1 aos poros da peça 5, conseguiram-se boas imagens resultantes do teste de iluminação, potenciadas pelo processamento efectuado nelas, o que permite ter alguma confiança nessa afirmação. Os algoritmos utilizados não foram, de todo, complexos, mas isso também foi permitido porque, ao ser utilizado um sistema de iluminação adequado no momento de captura da imagem, é aliviado muito do trabalho a ser feito pelos algoritmos de tratamento de imagem.

4.4 Conclusão

Neste capítulo foi então descrito o método de teste utilizado para verificar as condições de iluminação ideais para a detecção dos defeitos nas peças, juntamente com a mostra dos principais resultados das fotografias tiradas a esses defeitos. Os resultados obtidos permitem então concluir que os métodos de iluminação pensados anteriormente se adequam à morfologia dos defeitos a estudar, quando estes se encontram nas faces da peça. Os defeitos presentes em arestas tornam-se, no entanto, mais difíceis de iluminar correctamente devido à geometria e acabamento superficial da peça. As técnicas que se pensam ser mais apropriadas para este tipo de defeitos, são então o domo e o *dark field ring*, por causa do maior contraste causado no maior número de defeitos. Isto é depois reiterado após aplicação de algumas técnicas simples de tratamento de imagem, pois conseguem-se ver os defeitos que se procuram detectar mais facilmente. A configuração ideal de iluminação, apesar destes resultados, é difícil de se dizer com certeza, devido à configuração mecânica do anel e do domo que necessitam de ter a sua distância à peça alterada consoante a face, mas que passará por utilizar este tipo de soluções.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalho Futuro

5.1 Cumprimento dos Objectivos

O trabalho foi dividido em duas partes distintas: a parte de projecto mecânico e electrónico e a fase de testes de iluminação. Depois da caracterização do sistema, ao longo deste trabalho foram sendo justificadas todas as decisões feitas para a parte electromecânica, tanto em termos da escolha de elementos como do seu funcionamento. A parte mecânica recaiu mais sobre a parte estrutural, debruçando-se sobre a maneira de como os diferente componentes encaixam juntos, enquanto que a parte electrónica se virou mais para o controlo e automação do sistema. Um dos resultados então deste trabalho foi um sistema funcional, dimensionado para aplicações de Visão Artificial, possibilitando a execução de vários tipos de testes (Iluminação, detecção de defeitos, etc.).

De maneira a fazer cumprir os requisitos inicialmente propostos para o correcto funcionamento da parte electromecânica, e objecto de estudo da segunda parte desta dissertação, foi preparado e executado um estudo para implementação de tecnologias de Visão Artificial, em peças de alumínio, para que se tentasse detectar os defeitos existente em puxadores. Esse estudo passou por tentar descobrir qual a iluminação ideal a utilizar, bem como quais os algoritmos de análise de imagem a aplicar. No entanto, o teste feito acabou por demonstrar que não existe uma solução única de iluminação para este caso, sendo as técnicas a utilizar altamente dependentes do defeito que se procura. Existem algumas técnicas que conseguem lidar com um maior número de casos, mas não dispensam de métodos alternativos para cobrirem todos os defeitos possíveis.

Aplicando algumas técnicas de segmentação de imagens, as imagens mostram-se promissoras para que seja possível a detecção dos defeitos. Ainda que a interpretação feita aos resultados seja apenas qualitativa, o facto de se conseguirem estes resultados, tendo em conta a simplicidade das ferramentas e do processo utilizado no processamento de imagem, legitima a usabilidade de um processamento de imagem mais completo às fotografias obtidas.

5.2 Trabalhos Futuros

Visto que esta dissertação serviu como primeira abordagem à Visão Artificial em peças de alumínio, esta foi feita de maneira a ser possível a sua continuidade, em trabalhos futuros:

- Utilização de técnicas avançadas de iluminação, que permitam abordar novos casos, como é o exemplo de técnicas como o *Photometric Stereo* ou da Luz Estruturada. Estas técnicas além de soluções de iluminação, são algoritmos de tratamento de imagem;
- Criação de Algoritmos robustos de detecção de defeitos, utilizando imagens capturadas pela câmara. Este foi o aspecto onde esta dissertação ficou curta, por isso é onde há mais espaço para melhoramento. Além das técnicas mais comuns, sugere-se até a implementação de Inteligência Artificial e/ou Redes Neurais para detectar falhas nas peças;
- Aprofundamento do caso de estudo dos puxadores, em especial em outras geometrias, utilizando técnicas de filmagem à medida que a peça vai rodando, de maneira a conseguirem ser considerados todos os ângulos de incidência da iluminação.

Anexo A

Definições operacionais - Padrões Visuais - STA

Description :

Definições Operacionais

*Operational
Definitions*

Padrões Visuais

*Visual
Defaults*

Rev. 0 Data: 28-02-2013

Description :

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO *QUALITY AND INSPECTION CRITERIA*

REVISÕES [REVISIONS]:

Revisão Version	Descrição Description	Data Date

Rev. 0 Data: 28-02-2013

Description :

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

ÍNDICE [INDEX]:

1. ÂMBITO[SCOPE]
2. APLICAÇÃO[APPLICATION]
3. AMOSTRAGEM[SAMPLING]
4. DEFINIÇÕES[DEFINITIONS]
5. PROCEDIMENTO E CONDIÇÕES DE CONTROLO [CONTROL
PROCEDURE AND TERMS]
6. CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES[CHARACTERIZATION OF
SURFACES]
7. VISUALIZAÇÃO DOS DEFEITOS [DEFECTS VISUALIZATION]

Rev. 0

Data: 28-02-2013

Description :

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

1. ÂMBITO[SCOPE]:

Descrever a classificação dos defeitos de forma a assegurar a expedição de peças dentro das especificações do cliente. *Describe the fault classification to ensure the expedition of pieces according the specification of the customer.*

Os critérios escritos, em conjunto com as imagens, têm como objetivo definir os limites de aceitação de forma objetiva. *The written criteria, together with the images, are intended to objectively define the limits of acceptance.*

2. APLICAÇÃO[APPLICATION] :

Inspeção, para fundição de ligas de alumínio injetado, zamak e fundição por gravidade. *This instruction be applied for the in-line and final inspections for pieces on Aluminum injection, Zamak and Gravity.*

3. DIMENSÃO DA AMOSTRA [SAMPLING SIZE]:**3.1 Sobinco-peças em bruto [Sobinco brute pieces]:**

Batch Quantity	Powder coating	Natlak
≤ 500	/	5
500 - 1000	5	5
1000 – 2000	10	10
2000 – 3000	15	15
3000 – 4000	20	20
≥ 4000	25	25

Rev. 0

Data: 28-02-2013

Description :

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

3.2 Sobinco - peças acabadas [Sobinco finished pieces]:

Tabela de amostragem da Sobinco

3.3 STA- peças acabadas (pintadas) [STA FINISHED PIECES]:

Controlo visual a 100%, feito pelo operador da produção.

100% visual control, in line control by the operator

3.4 STA- peças em bruto [STA brute pieces]:

[IT-0026](#) – Qualidade robot de esmerilagem

[IT-0043](#) – Ensaio pintura às peças de fundição Injectada de alumínio

3.5 STA – Lotes (no caso de reclamação ou de dúvida da qualidade existente [Batch (in case of complaint or doubt about its quality)])

Peças em bruto [Brute Pieces] e Peças acabadas [Finished Pieces]:

Tabela de amostragem peças produzidas e/ou acabadas na STA

Rev. 0 Data: 28-02-2013

Description :

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

4. DEFINIÇÕES[DEFINITIONS] :

- **Lote :** Remessa de peças compostas por unidades do mesmo item, sob as mesmas condições de produção. *Batch : A defined quantity of parts of the same item produced under the same conditions.*
- **Amostra :** Quantidade representativa de peças recolhidas do lote, para inspeção. *Sample : representative quantity of pieces selected for inspection.*
- **Defeito :** É um desvio em relação às características definidas para um produto (pode ser funcional e/ou estético). *Defect : Is a deviation concerning the specifications defined for a product (can be esthetical or functional).*
- **Grande Defeito:** É quando o defeito irá resultar em rejeição por parte do cliente. *Major defect : It's when the default will result in rejection by the customer.*
- **Pequeno Defeito:** É quando o defeito não irá resultar em rejeição por parte do cliente. *Minor defect : It's when the default will not result in rejection by the customer.*
- **Ponto de Atenção :** Quando uma característica definida para um produto se aproxima dos limites de especificação, sem os exceder. *Remark : When the characteristic defined for a product lies close to the specification limits without exceeding them.*
- **Lote Rejeitado :** Lote que excede os limites de especificação. *Rejected batch : is a batch that exceeds the specification limits*

Rev. 0 Data: 28-02-2013

Description :

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

5. Procedimento e Condições de Controlo [Control Procedure and Terms]:

5.1 Condições de Luminosidade [lighting conditions]:

Posto trabalho onde se faz o controlo visual deve ter ao nível do plano de trabalho no mínimo 800 Lux e *Work station where visual control is done, must have minimum 800 Lux light*

5.2 Método de inspeção [distance inspection]:

A inspeção é feita a cerca de meio braço de distância dos olhos (25 – 30 cm) ; em caso de dúvida a inspeção deve ser feita à distancia de um braço (50 – 60 cm dos olhos) rodando a peça para que seja observada nas diferentes incidências de luz. *The inspection is done at a distance of half an arm length (25-30cm from eyes); in case of doubt it must be done at a distance of an arm length (50-60cm) turning the piece into different light incidences.*

5.3 Requisitos Visuais [visual requirements]:

O operador deve ser boa acuidade visual. *Operators must pass specific vision requirements.*

Rev. 0

Data: 28-02-2013

Description :

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

6. Caracterização das Superfícies [Characterization of surfaces] :

As superfícies são caracterizadas de acordo com o tipo de peça:

The surfaces are characterized according to the type of piece:

- **Bases [Base]**
- **Manípulos de porta e janela [door and window handles]**
- **Dobradiças [hinges]**

Dada a variedade de peças, dentro de cada família, poderão ser considerados exceções. Given the variety of parts, within each family exceptions are considered.

É considerada **zona visível (assinalada a azul) aquela que após montagem, na porta ou janela, é visível para o utilizador. It is considered visible area (indicated in blue) if after assembly, on the door or window, it is visible to the user.**

É considerada **zona não visível (assinalada a roxo) aquela que após montagem, na porta ou janela, não é visível para o utilizador. It is considered not visible area (indicated in purple) if after assembly, on the door or window, it isn't visible to the user.**

É ainda considerada a **zona funcional da peça (assinalada a amarelo); nesta zona não se aplicam os critérios definidos neste manual, uma vez que esta zona fica coberta após montagem. It is considered functional area (indicated in yellow) if after assembly, on the door or window, it isn't visible to the user.**

Para melhor perceção dos defeitos as fotos estão acompanhadas de uma escala milimétrica. For better perception of defects photos are accompanied by a millimeter scale.

Rev. 0

Data: 28-02-2013

Description :

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

6.1. Bases

Bases



Rev. 0

Data: 28-02-2013

Description :

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

6.2. Manípulos de janela e de porta

Window and door handles



Rev. 0

Data: 28-02-2013

Description :

Rev. 0

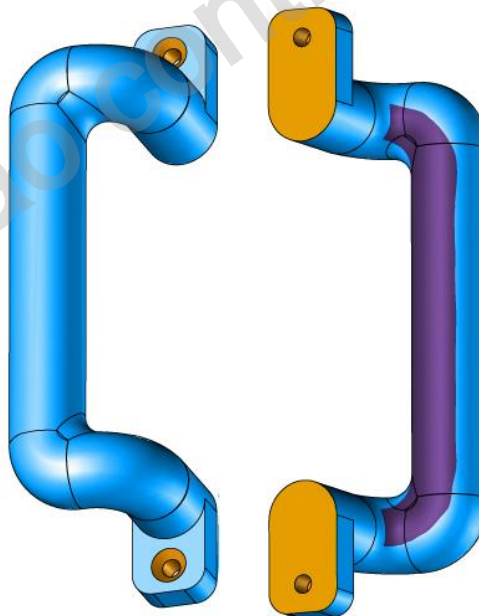
Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

6.2.1 Manípulos de porta (exceção)

Door handle (exception)



Description :

Rev. 0

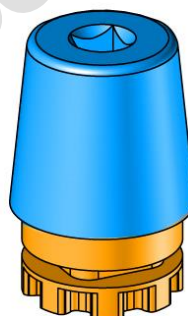
Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

6.2.2 Manípulos de janela (exceção)

Window handles (exception)



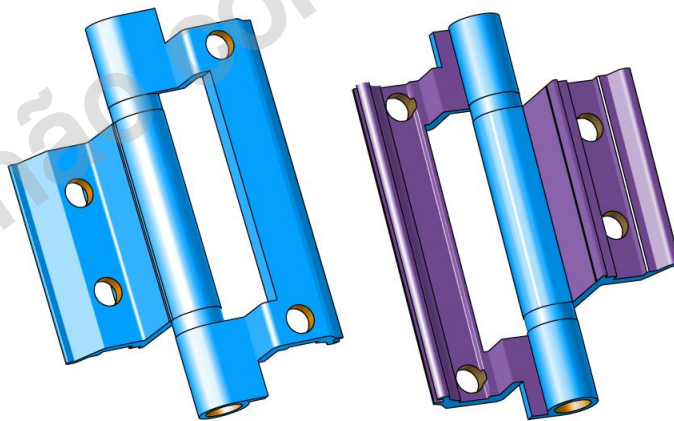
Description :

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

6.3 Dobradiças

Hinges



Rev. 0

Data: 28-02-2013

Description :

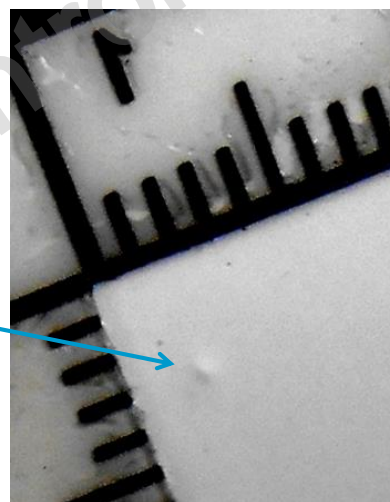
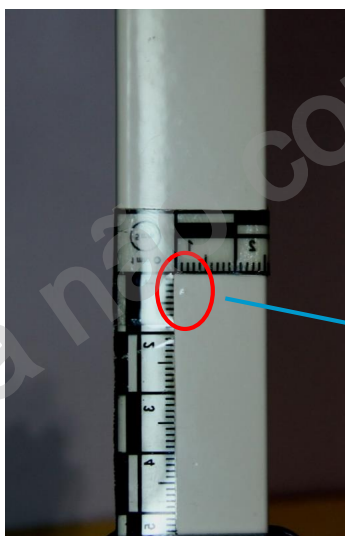
- **Zona visível** : aceite se não se conseguir ver á distância de inspeção. **Visible Side**: is accepted if you can not see it form a distance inspection.
- **Zona não visível**: é aceite se não se sentir na utilização do produto. **Not visible**: is accepted if you don't feel it when using the product.

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

7.1 Lixo

Inclusion



NOK

Rev. 0

Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

Description :

- Zona visível :** aceite se não se conseguir ver á distância de inspeção. **Visible Side:** is accepted if you can not see it form a distance inspection.
- Zona não visível:** é aceite se não se sentir na utilização do produto. **Not visible:** is accepted if you don't feel it when using the product.

Nota: em caso de dúvidas consultar a [IT-0041](#) - Controlo de espessuras

Note: in case of doubt check [IT-0041](#) - Control thickness

7.2 Excesso de tinta:escorrido

Overpainted: drained



NOK

Rev. 0

Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

Description :

- Zona visível :** aceite se não se conseguir ver á distância de inspeção. **Visible Side:** is accepted if you can not see it form a distance inspection.
- Zona não visível:** é aceite se não se sentir na utilização do produto. **Not visible:** is accepted if you don't feel it when using the product.

Nota: em caso de dúvidas consultar a IT-0041 - Controlo de espessuras

Note: in case of doubt check [IT-0041](#) - Control thickness

7.3 Excesso de tinta:casca de laranja

Overpainted: orange peel



NOK

Rev. 0

Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

Description :

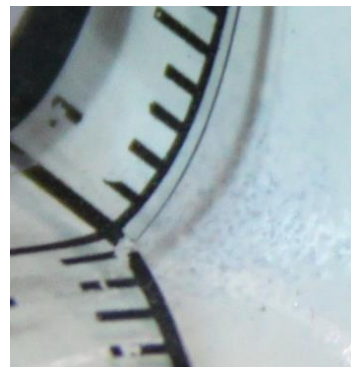
- **Zona visível :** aceite se o material base estiver completamente coberto(opaco), e se a cor estiver uniforme em toda a superfície e de acordo com os padrões de cor. **Visible side:** accepted if the base material is completely covered (opaque), and if the color is uniform across all the surface and according to the color standards.
- **Zona não visível:** aceite se o material de base estiver completamente coberto; alguma falta de uniformidade na cor é admissível. **Not visible:** is accepted if the base material is completely covered; some nonuniform color is acceptable.

Nota: em caso de dúvidas consultar a [IT-0041](#) - Controlo de espessuras

Note: in case of doubt check IT-0041 – Control thickness

7.4 Falta de tinta:

Lack of paint



NOK

Rev. 0

Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

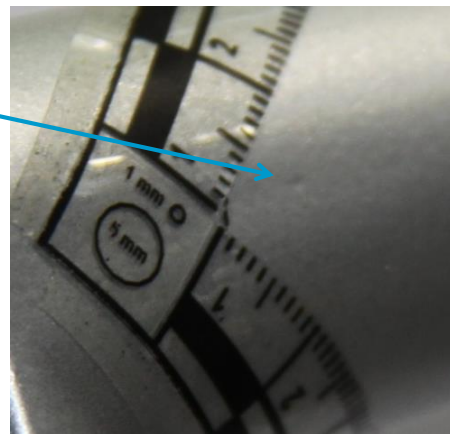
QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

Description :

- **Zona visível :** aceite se não se conseguir ver á distância de inspeção. **Visible Side:** is accepted if you can not see it form a distance inspection.
- **Zona não visível:** é aceite se não se sentir na utilização do produto. **Not visible:** is accepted if you don't feel it when using the product.

7.5 Mossa (pancada antes do acabamento)

Dint (knock before finishing)



NOK

Rev. 0

Data: 28-02-2013

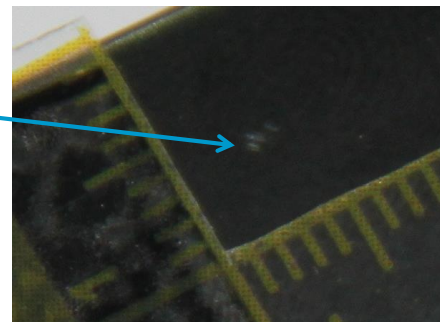
Description :

- **Zona visível :** aceite se não se conseguir ver á distância de inspeção. **Visible Side:** is accepted if you can not see it form a distance inspection.
- **Zona não visível:** é aceite se não se sentir na utilização do produto. **Not visible:** is accepted if you don't feel it when using the product.

Rev. 0 Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

7.6 Pancadas (pós acabamento) Knocks (after finishing)



NOK

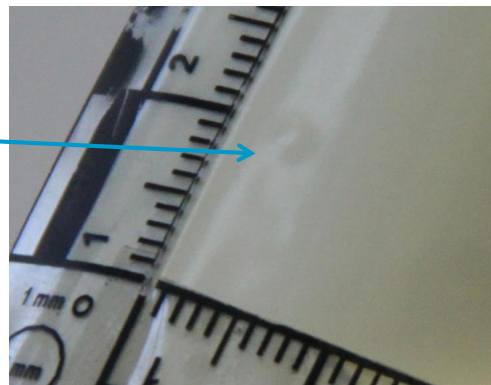
Description :

- **Zona visível :** aceite se não se conseguir ver á distância de inspeção. **Visible Side:** is accepted if you can not see it form a distance inspection.
- **Zona não visível:** é aceite se não se sentir na utilização do produto. **Not visible:** is accepted if you don't feel it when using the product.

Rev. 0 Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

7.7 Bolhas Bubbles



NOK

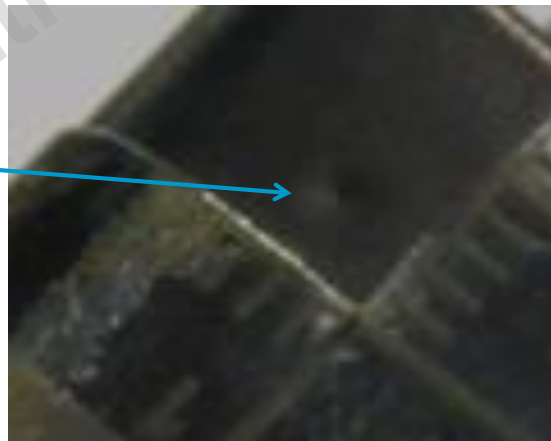
QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

Description :

- **Zona visível:** é aceite se não for visível á distância de inspeção.
Visible side: is accepted if you can not see it from a distance inspection.
- **Zona não visível:** não são aceites poros abertos nem poros que se sintam na utilização do produto.
Not visible: aren't accepted opened pores or that can be felt when using the product.

7.8 Poros

Porous



NOK

Rev. 0

Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

Description :

- **Zona visível e não visível:** é aceite se não for visível á distância de inspeção e se não se sentir na utilização do produto. *Visible side and Not Visible: is accepted if you can not see it from a distance inspection and if you don't feel it when using the product.*

7.9 Mau enchimento

Bad filling (incomplete piece)



NOK

Rev. 0

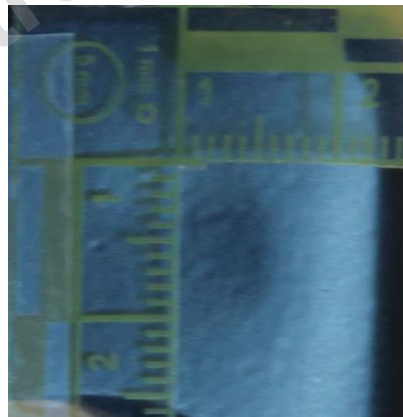
Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

Description :

- **Zona visível :** aceite se não se conseguir ver á distância de inspeção. **Visible Side:** is accepted if you can not see it form a distance inspection.
- **Zona não visível:** é aceite se não se sentir na utilização do produto. **Not visible:** is accepted if you don't feel it when using the product.

7.10 Rechupes Shrinkages



NOK

Rev. 0 Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

Description :

- **Zona visível :** é aceite se não for visível á distância de inspeção e se não se sentir na utilização do produto. **Visible side:** is accepted if you can not see it from a distance inspection and if you don't feel it when using the product.
- **Zona não visível:** é aceite se não se sentir na utilização do produto. **Not visible:** is accepted only if you don't feel it when using the product.

7.11 Esmerilagem(Facetar): Grinding faults (Flat surface – wrong shape)



NOK

Rev. 0 Data: 28-02-2013

Description :

- **Zona visível :** é aceite se não for visível á distância de inspeção e se não se sentir na utilização do produto. *Visible side: is accepted if you can not see it from a distance inspection and if you don't feel it when using the product.*
- **Zona não visível:** é aceite se não se sentir na utilização do produto. *Not visible: is accepted only if you don't feel it when using the product.*

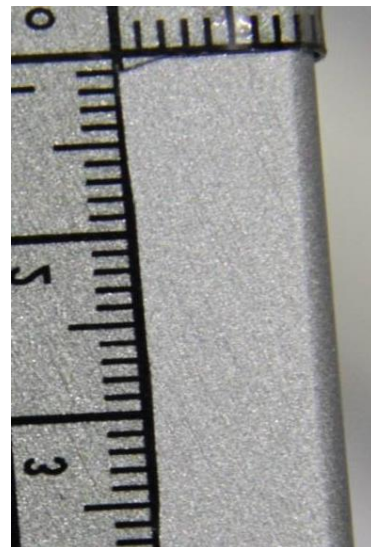
Rev. 0 Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

7.12 Esmerilagem(Riscos da lixa):

Grinding faults(Lines of Sandpaper)



NOK

Description :

- **Zona visível :** é aceite se não for visível á distância de inspeção e se não se sentir na utilização do produto. *Visible side: is accepted if you can not see it from a distance inspection and if you don't feel it when using the product.*
- **Zona não visível:** é aceite se não se sentir na utilização do produto. *Not visible: is accepted only if you don't feel it when using the product.*

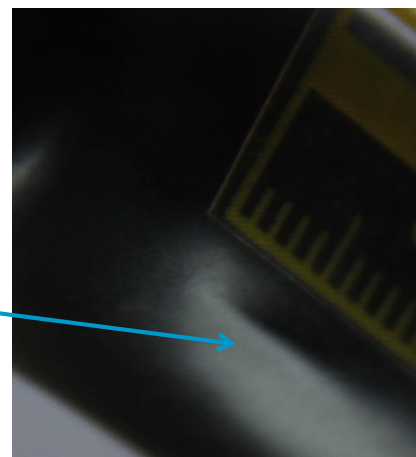
Rev. 0 Data: 28-02-2013

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

7.13 Esmerilagem(Linha de separação):

Grinding faults(Separation Line)



NOK

QUALIDADE E CRITÉRIOS DE INSPEÇÃO

QUALITY AND INSPECTION CRITERIA

Description :

- **Zona visível e Zona não visível:** é aceite se não for visível á distância de inspeção. **Visible side and Not visible side:** is accepted if you can not see it from a distance inspection

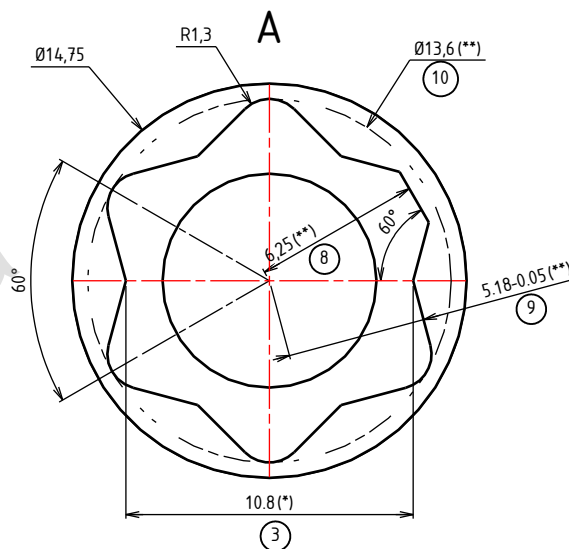
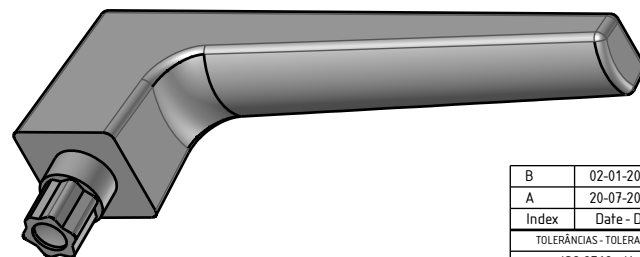
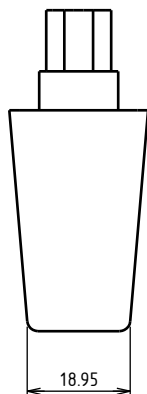
7.14 Gota (Mancha de plaforização) Spot from pretreatment





NOK

Anexo B

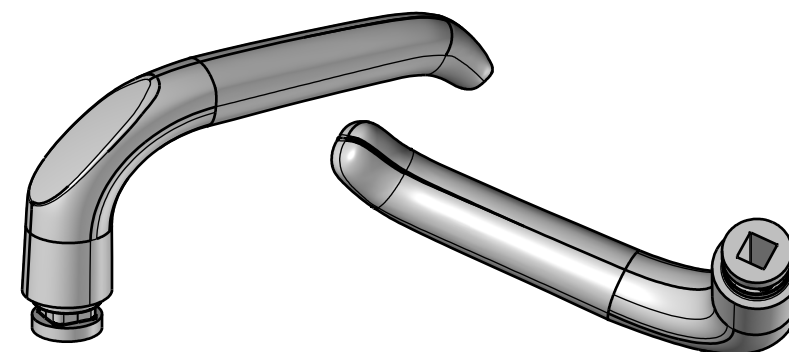
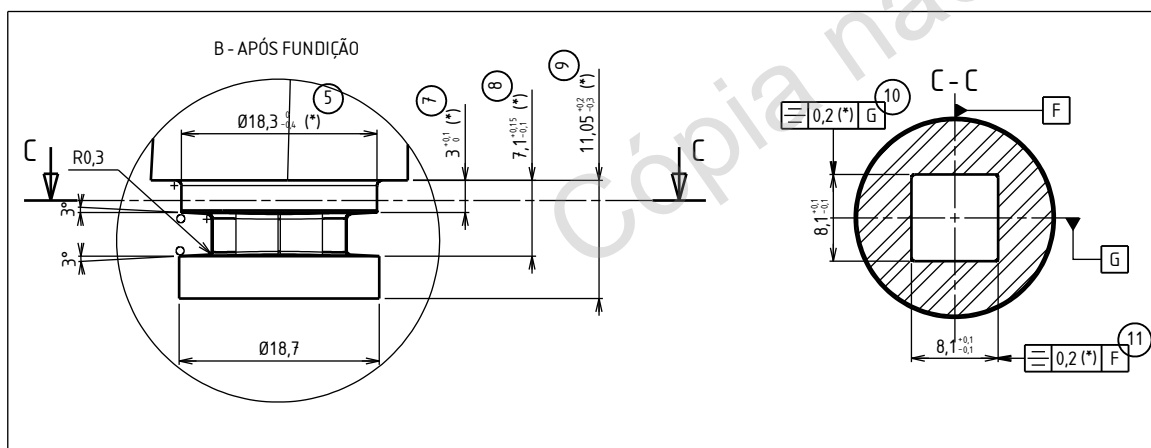
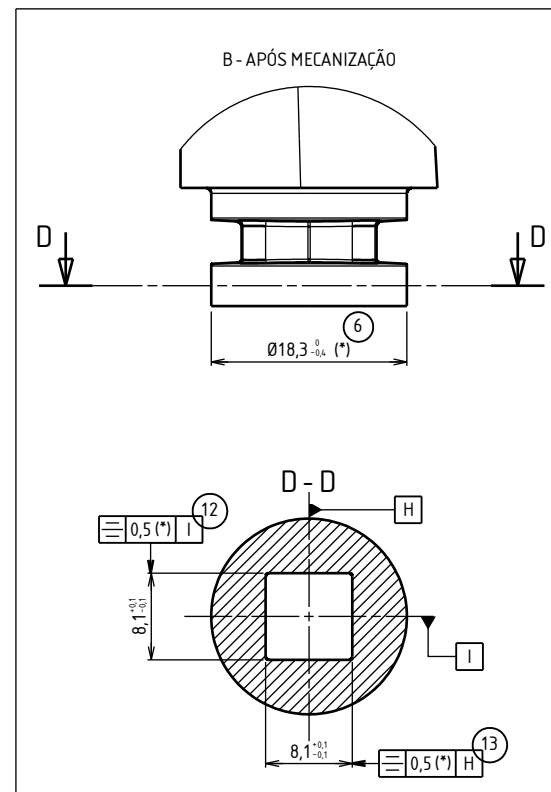
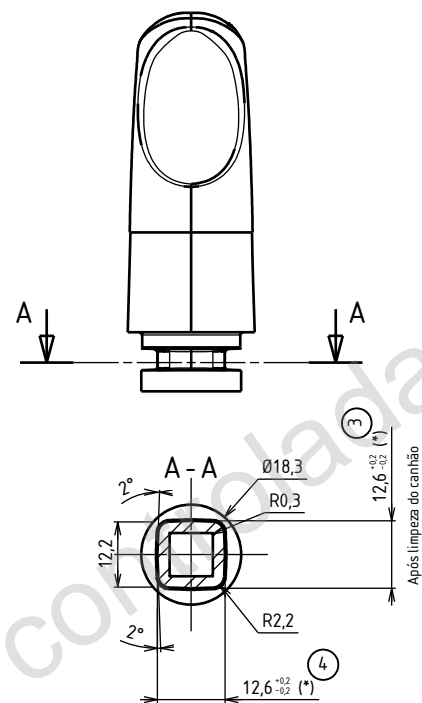
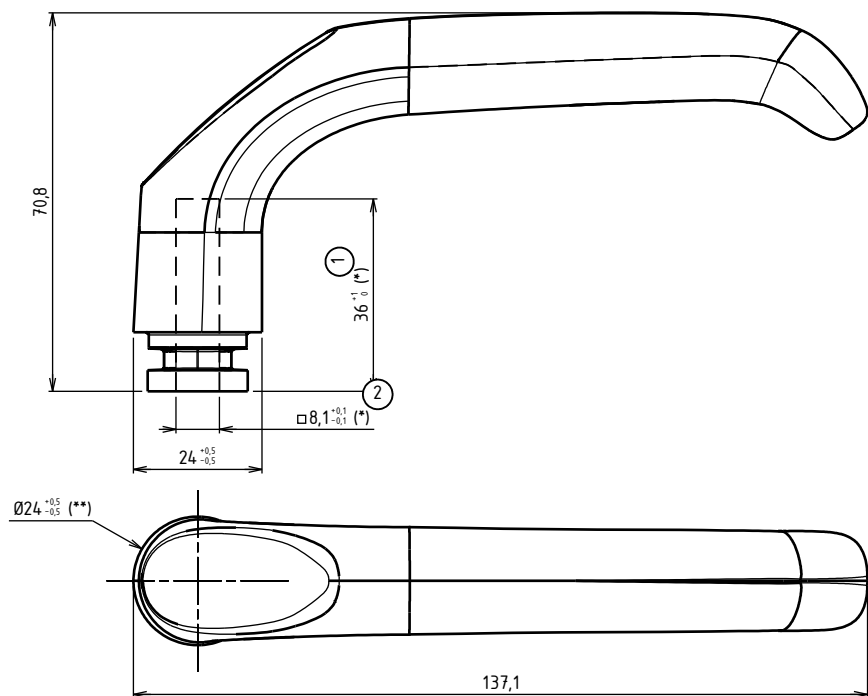
Desenho Técnico 1907-211.2



B	02-01-2018	R.G.	A cota N.º 4 com o valor de 26±0,3 era 26.							
A	20-07-2015	C.R.	Atualização do desenho para Top7							
Index	Date - Data	Name - Nome	Remarks - Alterações							
TOLERÂNCIAS - TOLERANCE		ACABAMENTO - FINISH		COTAS IMPORTANTES A CONTROLAR			MATERIAL - MATERIAL		PESO - WEIGHT	
ISO 2768 mK				(*) Sempre		(**) 3 em 3 0f's		AM3st		144.29g
COTAS	FINO	MÉDIO	GROSSO	1 : 2  	DESCRIÇÃO DESCRIPTION	Manípulo 1907/211.2			ESTADO STATUS	A
0.5±3	±0.05	±0.1	±0.2						REVISÃO PART REV	
3±6	±0.05	±0.1	±0.3			RESPONSÁVEL PROJECT OWNER	C.R.			
6±30	±0.1	±0.2	±0.5							
30±120	±0.15	±0.3	±0.8		DESENHO N.º DRAWING N.º	A3AL1907/211.2				
120±400	±0.2	±0.5	±1.2	DATA CREATION DATE	20-07-2015				PROJETO PROJECT	1907
400±1000	±0.3	±0.8	±2							

Anexo C

Desenho Técnico - 82000.2AG



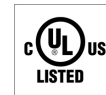
○ = R0,2
+ = R0,5

NOTA: espessura de anodização 16 µm

G	01/09/2017	P.M.	Desenho atualizado para TopSolid 7 e mudança de liga de AG4Z para AlMg3			
Index	Date - Data	Name - Nome	Remarks - Alterações			
TOLERÂNCIAS - TOLERANCE		ACABAMENTO - FINISH		COTAS IMPORTANTES A CONTROLAR		MATERIAL - MATERIAL
ISO 2768 FK				(*) Sempre	(**) 3 em 3 0f's	AlMg3
COTAS		FINO	MÉDIO	GROSSO		
0,5 a 3		±0,05	±0,1	±0,2		
3 a 6		±0,05	±0,1	±0,3		
6 a 30		±0,1	±0,2	±0,5		
30 a 120		±0,15	±0,3	±0,8		
120 a 400		±0,2	±0,5	±1,2		
400 a 1000		±0,3	±0,8	±2		
		1:1				
				DESCRIÇÃO	Manípulo 82000.2 AG	
				DESENHO N°	A3AL82000.2AG	
				DRAWING N°		
				DATA	01/09/2017	PROJETO
				CREATION DATE	01/09/2017	PROJECT
					82000.2	RESPONSÁVEL
						DESIGNER
						CREATOR
						P.M.
						P.M.

Anexo D

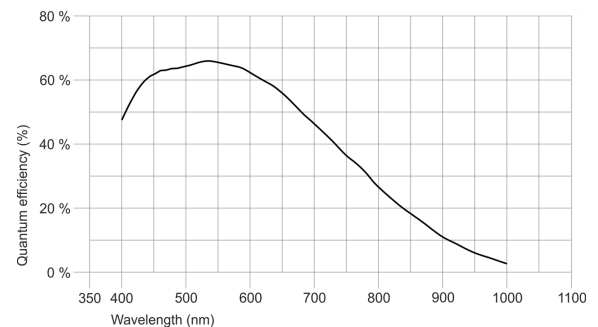
Datasheet da câmara IDS uEYE 3270



Specification

Sensor

Sensor type	CMOS Mono
Shutter	Global Shutter
Sensor characteristic	Linear
Readout mode	Progressive scan
Pixel Class	3 MP
Resolution	3.17 Mpix
Resolution (h x v)	2056 x 1542 Pixel
Aspect ratio	4:3
ADC	12 bit
Color depth (camera)	12 bit
Optical sensor class	1/1.8"
Optical Size	7.093 mm x 5.320 mm
Optical sensor diagonal	8.87 mm (1/1.8")
Pixel size	3.45 µm
Manufacturer	Sony
Sensor Model	IMX265LLR-C
Gain (master/RGB)	24x/4x
AOI horizontal	same frame rate
AOI vertical	increased frame rate
AOI image width / step width	256 / 8
AOI image height / step width	2 / 2
AOI position grid (horizontal/vertical)	4 / 2
Binning horizontal	-
Binning vertical	increased frame rate
Binning method	Mono
Binning factor	2
Subsampling horizontal	same frame rate
Subsampling vertical	same frame rate
Subsampling method	M/C automatic
Subsampling factor	2, 4, 6, 8, 16



Model

Pixel clock range	70 MHz - 197 MHz
Frame rate freerun mode	57
Frame rate trigger (continuous)	57
Frame rate trigger (maximum)	57
Exposure time (minimum - maximum)	0.024 ms - 999 ms
Long exposure (maximum)	30000 ms
Power consumption	1.1 W - 3.1 W
Image memory	128 MB
Special features	IDS line scan mode, Overlap trigger, Sensor source gain

Ambient conditions

The temperature values given below refer to the outer device temperature of the camera housing.

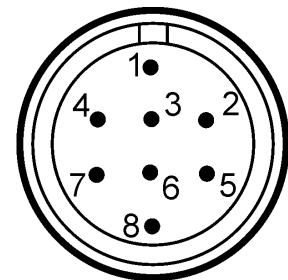
Device temperature during operation	0 °C - 55 °C / 32 °F - 131 °F
Device temperature during storage	-20 °C - 60 °C / -4 °F - 140 °F
Humidity (relative, non-condensing)	20 % - 80 %

Connectors

Interface connector	USB 3.0 micro-B, screwable
I/O connector	8-pin Hirose connector (HR25-7TR-8PA(73))
Power supply	USB cable

Pin assignment I/O connector

1	Ground (GND)
2	Flash output with optocoupler (-)
3	General Purpose I/O (GPIO) 1
4	Trigger input with optocoupler (-)
5	Flash output with optocoupler (+)
6	General Purpose I/O (GPIO) 2
7	Trigger input with optocoupler (+)
8	Output supply voltage, 5 V (100 mA)



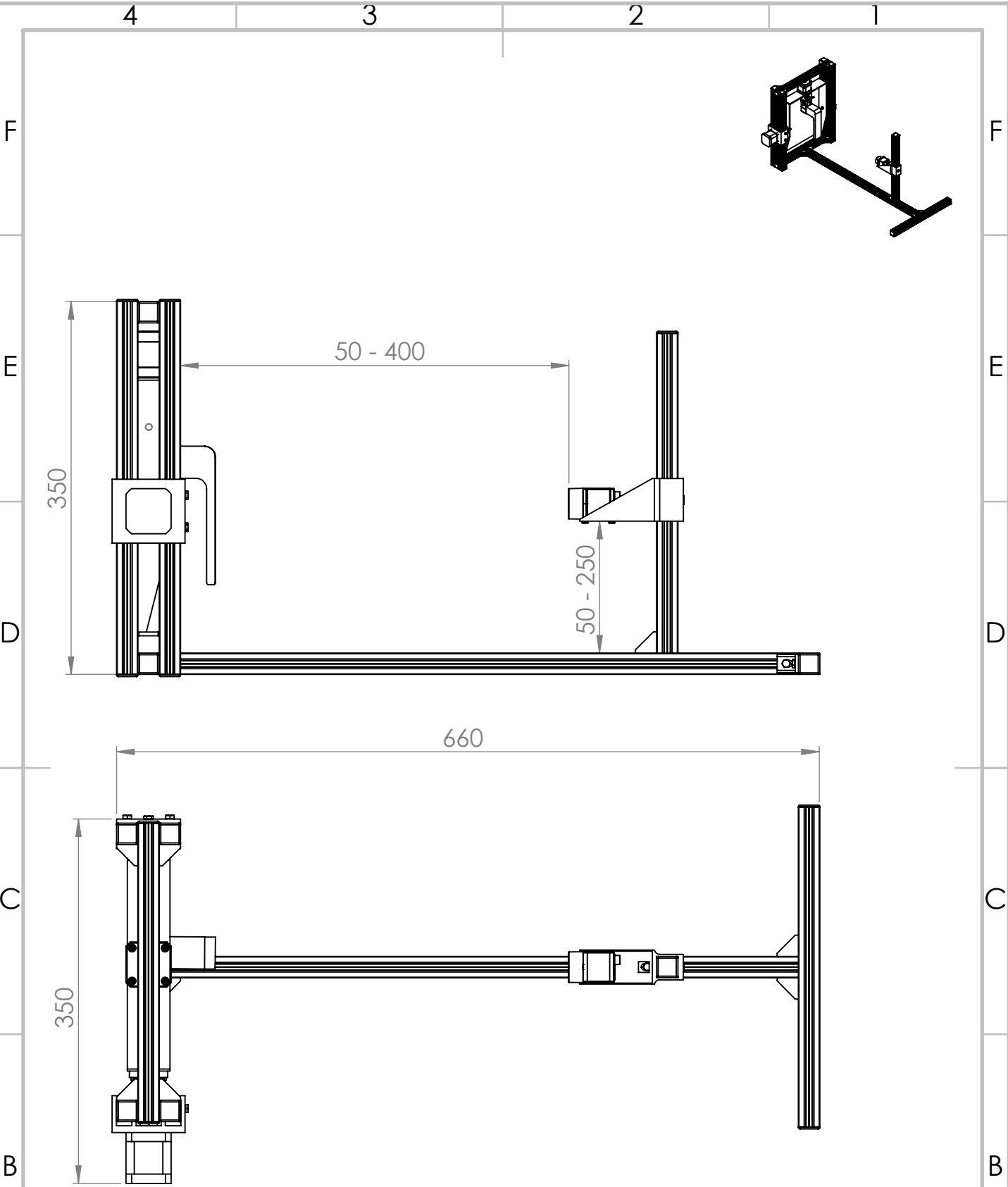
Camera rear view

Design

Lens Mount	C-Mount
IP code	IP30
Dimensions H/W/L	29.0 mm x 29.0 mm x 29.0 mm
Mass	52 g

Anexo E

Desenho geral do sistema mecânico



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

MATERIAL:

WEIGHT:

TITLE:

DWG NO.

SCALE:1:10

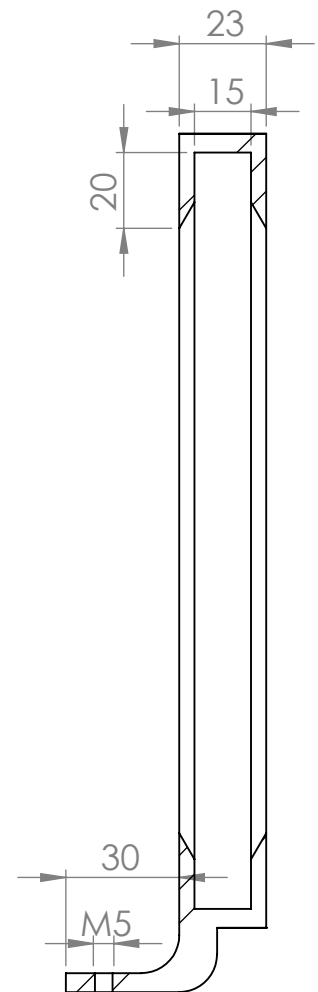
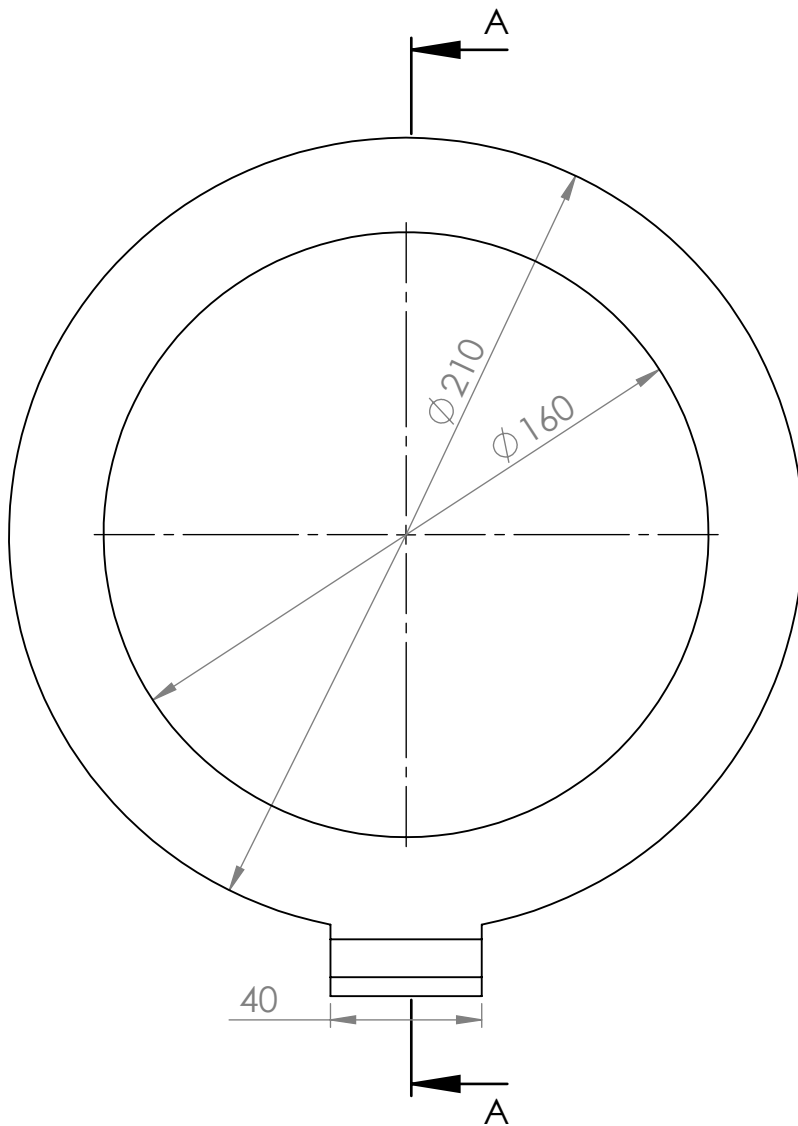
5a iteracao

A4

SHEET 1 OF 1

Anexo F

Desenho do anel projectado



SECTION A-A
SCALE 1 : 2

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

TITLE:

MATERIAL:

DWG NO.

anel_iluminacao

A4

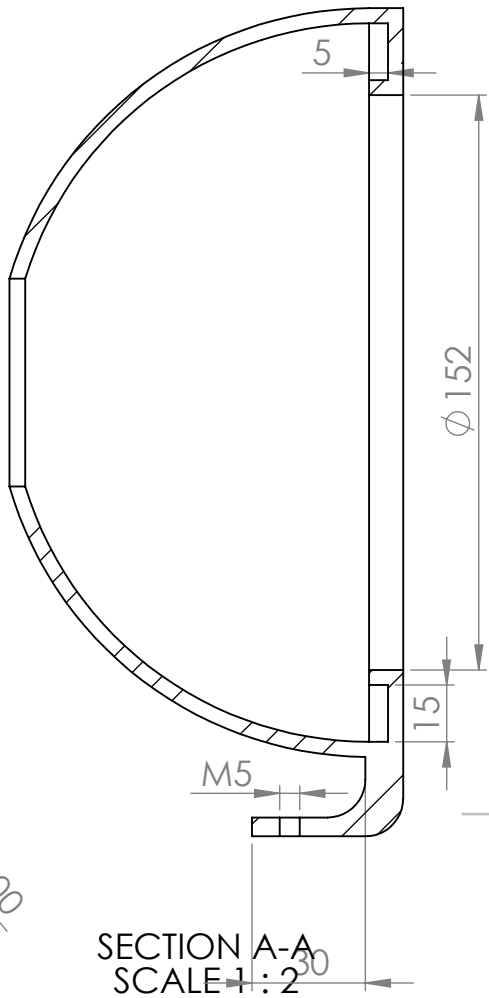
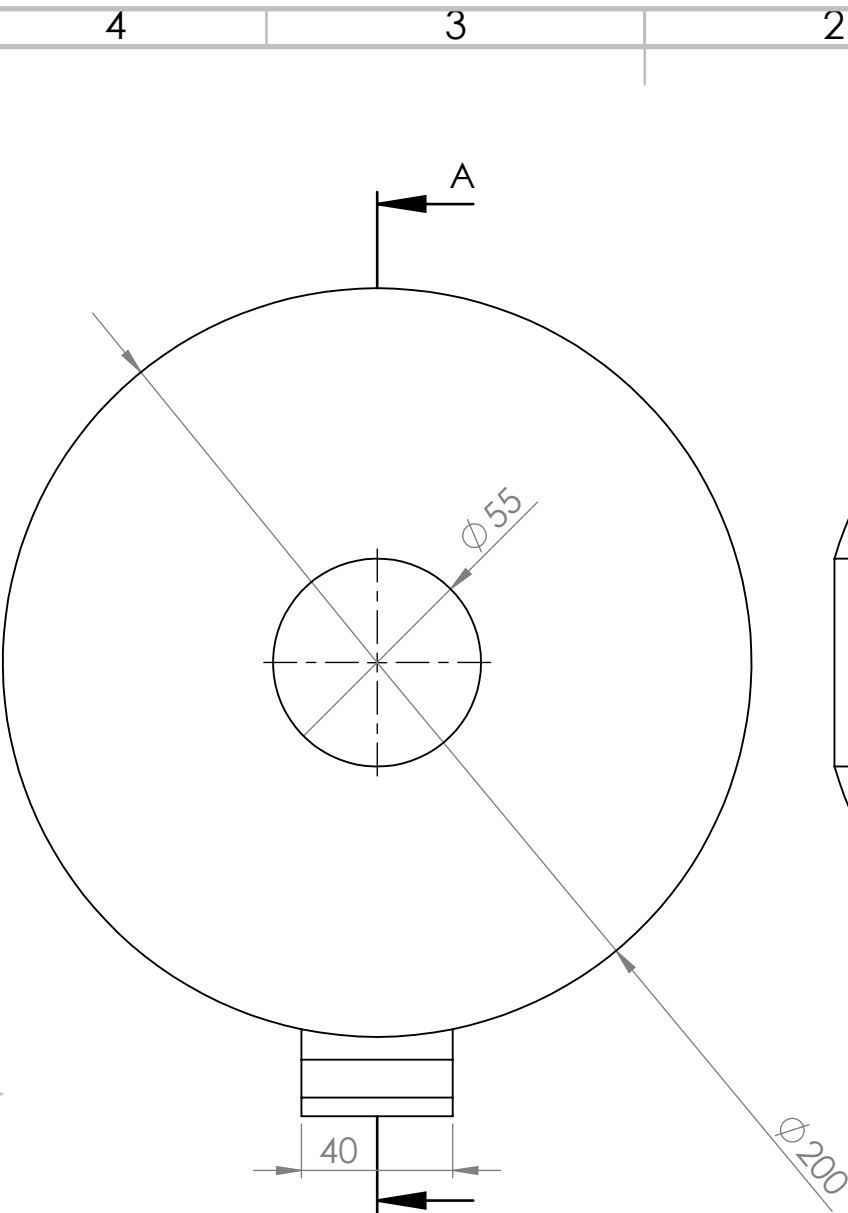
WEIGHT:

SCALE:1:5

SHEET 1 OF 1

Anexo G

Desenho do Domo projectado



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

FINISH:

DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

	NAME	SIGNATURE	DATE		
DRAWN					
CHK'D					
APPV'D					
MFG					
Q.A					

TITLE:

DWG NO.

MATERIAL:

WEIGHT:

SCALE:1:5

SHEET 1 OF 1

Domo

A4

Anexo H

Programa utilizado em testes iniciais, apenas para comando da fita de LED, utilizado no *Arduino*

Código H.1: Rotina inicial de procura do fim de curso

```
1 #include <Adafruit_NeoPixel.h>
2 #ifdef __AVR__
3 #include <avr/power.h>
4 #endif
5
6 #define PIN          8
7
8 #define NUMPIXELS    29
9 #define BUTTON       6
10
11 #define COLOR_VAL    255
12
13 int delayval = 10;
14 int state = -1, old_state = -1;
15 int button_pressed = 1;
16
17 Adafruit_NeoPixel strip = Adafruit_NeoPixel(NUMPIXELS, PIN,
18     NEO_GRBW + NEO_KHZ800);
19
20 void setStripColor(int r, int g, int b, int w){
21     for(int i=0; i<NUMPIXELS; i++){
```

Programa utilizado em testes iniciais, apenas para comando da fita de LED, utilizado no Arduino

```
21     strip.setPixelColor(i, strip.Color(r,g,b,w));
22     delay(5);
23 }
24 strip.show();
25 }
26
27
28 void setup() {
29     strip.begin();
30     strip.show();
31     pinMode(BUTTON, INPUT);
32
33     setStripColor(255,0,0,0);
34     delay(150);
35     setStripColor(0,255,0,0);
36     delay(150);
37     setStripColor(0,0,255,0);
38     delay(150);
39     setStripColor(0,0,0,0);
40     delay(150);
41 }
42
43
44 void loop() {
45     int button_pressed = !digitalRead(BUTTON);
46     while(!digitalRead(BUTTON));
47     if (button_pressed) {
48         state++;
49     }
50     if (state>5)
51         state=0;
52
53     switch(state) {
54         case 0:
55             if (old_state!=state) {
56                 setStripColor(COLOR_VAL,0,0,0);
57                 old_state = state;
58             }
59             break;
60         case 1:
```

```
61     if (old_state!=state) {
62         setStripColor(0,COLOR_VAL,0,0);
63         old_state = state;
64     }
65     break;
66 case 2:
67     if (old_state!=state) {
68         setStripColor(0,0,COLOR_VAL,0);
69         old_state = state;
70     }
71     break;
72 case 3:
73     if (old_state!=state) {
74         setStripColor(COLOR_VAL,COLOR_VAL,COLOR_VAL,0);
75         old_state = state;
76     }
77     break;
78 case 4:
79     if (old_state!=state) {
80         setStripColor(COLOR_VAL,COLOR_VAL,COLOR_VAL,COLOR_VAL);
81         old_state = state;
82     }
83     break;
84 case 5:
85     if (old_state!=state)
86     {
87         setStripColor(0,0,0,0);
88         old_state = state;
89         delay(delayval);
90     }
91     state = -1;
92     old_state = -1;
93     break;
94 default:
95     break;
96 }
```

128 Programa utilizado em testes iniciais, apenas para comando da fita de LED, utilizado no Arduino

Anexo I

Programa completo de comando de luzes e controlo dos motores, utilizado no *Arduino*

Código I.1: Rotina inicial de procura do fim de curso

```
1 #define X_STEP_PIN      54
2 #define X_DIR_PIN       55
3 #define X_ENABLE_PIN    38
4
5 #define Y_STEP_PIN      60
6 #define Y_DIR_PIN       61
7 #define Y_ENABLE_PIN    56
8
9 #define SDPOWER          -1
10 #define SDSS             53
11 #define LED_PIN          13
12
13 #define buttonX           32
14 #define buttonY           47
15 #define button_half      35
16 #define button_Xfine1    39
17 #define button_Xfine2    37
18
19 #define Y_ENDSTOP_PIN     3
20
21 #include <Adafruit_NeoPixel.h>
```

```
22 #ifdef __AVR__
23 #include <avr/power.h>
24 #endif
25
26 #define PIN_LED_RING      45
27 #define PIN_LED_DOME      41
28 #define NUMPIXELS1       36 //no. of neopixels in the ring
29 #define NUMPIXELS2       30 //no. of pixels in the dome
30 #define button_led       43
31 #define color_val_ring   255
32 #define color_val_dome   255
33
34 Adafruit_NeoPixel strip1 = Adafruit_NeoPixel(NUMPIXELS1,
        PIN_LED_RING, NEO_GRB + NEO_KHZ800);
35 Adafruit_NeoPixel strip2 = Adafruit_NeoPixel(NUMPIXELS2,
        PIN_LED_DOME, NEO_GRBW + NEO_KHZ800);
36
37 int buttonX_press = 1;
38 int buttonY_press = 1;
39 int button_Xfine1_press = 1;
40 int button_Xfine2_press = 1;
41
42 int steps_x = 1600; //6400 steps = aprox. 360 degrees
43 int steps_y_front = 1600;
44 int steps_y_back = 1400;
45 int teststeps = 1067;
46 int fine_steps = 5;
47
48 int speed_x = 500; //delay between step, in ms
49 int speed_y = 2000;
50 int test_speed = 4000;
51 int fine_speed = 1000;
52
53 int state_y = -1, old_state_y = -1;
54 int state_half_turn = -1, old_state_half_turn = -1;
55 int steps_x_turn = 0;
56 int steps_y_front_turn = 0;
57 int steps_y_back_turn = 0;
58
59 int state_led = -1, old_state_led = -1;
```

```
60 int button_led_press = 1;
61
62
63 void setStripColor1(int r, int g, int b){
64     for(int i=0;i<NUMPIXELS1;i++){
65         strip1.setPixelColor(i, strip1.Color(r,g,b));
66         delay(5);
67     }
68     strip1.show();
69 }
70
71
72 void setStripColor2(int r, int g, int b, int w){
73     for(int i=0;i<NUMPIXELS2;i++){
74         strip2.setPixelColor(i, strip2.Color(r,g,b,w));
75         delay(5);
76     }
77     strip2.show();
78 }
79
80
81 void setup() {
82     pinMode(LED_PIN , OUTPUT);
83
84     pinMode(X_STEP_PIN , OUTPUT);
85     pinMode(X_DIR_PIN , OUTPUT);
86     pinMode(X_ENABLE_PIN , OUTPUT);
87
88     pinMode(Y_STEP_PIN , OUTPUT);
89     pinMode(Y_DIR_PIN , OUTPUT);
90     pinMode(Y_ENABLE_PIN , OUTPUT);
91
92     digitalWrite(X_ENABLE_PIN , LOW);
93     digitalWrite(Y_ENABLE_PIN , LOW);
94
95     pinMode(buttonX, INPUT);
96     pinMode(buttonY, INPUT);
97     pinMode(button_half, INPUT);
98     pinMode(Y_ENDSTOP_PIN, INPUT);
99 }
```

```
100  strip1.begin();
101  strip1.show();
102  strip2.begin();
103  strip2.show();
104  pinMode(button_led, INPUT);
105
106  setStripColor1(255,255,255);
107  delay(200);
108  setStripColor1(0,0,0);
109  delay(200);
110  setStripColor2(255,255,255,255);
111  delay(200);
112  setStripColor2(0,0,0,0);
113  delay(1000);
114
115  while (!digitalRead(Y_ENDSTOP_PIN)) {
116      if (!digitalRead(buttonY)) {
117          for (int n=0; n <= teststeps; n++){
118              digitalWrite(Y_DIR_PIN, HIGH);
119              digitalWrite(Y_STEP_PIN, HIGH);
120              delayMicroseconds(test_speed);
121              digitalWrite(Y_STEP_PIN, LOW);
122          }
123      }
124      else
125      {
126          digitalWrite(Y_DIR_PIN, LOW);
127          digitalWrite(Y_STEP_PIN, HIGH);
128          delayMicroseconds(test_speed);
129          digitalWrite(Y_STEP_PIN, LOW);
130      }
131  }
132  delay(2000);
133 }
134
135 void loop() {
136     int buttonX_press = !digitalRead(buttonX);
137     int buttonY_press = !digitalRead(buttonY);
138     int button_half_press = !digitalRead(button_half);
139     int button_Xfine1_press = !digitalRead(button_Xfine1);
```

```
140 int button_Xfine2_press = !digitalRead(button_Xfine2);
141 int button_led_press = !digitalRead(button_led);
142
143 if (buttonY_press){state_y++;}
144 if (state_y > 3){state_y = 0;}
145 if (button_half_press){state_half_turn++;delay(300);}
146 if (state_half_turn > 1){state_half_turn=0;delay(300);}
147 if (button_led_press){state_led++;delay(300);}
148 if (state_led>3){state_led=0;}
149
150 switch (state_half_turn){
151     case 0:
152         if (old_state_half_turn!=state_half_turn){
153             steps_x_turn = steps_x/2;
154             steps_y_front_turn = steps_y_front/2;
155             steps_y_back_turn = steps_y_back/2;
156             old_state_half_turn=state_half_turn;
157         }
158         break;
159     case 1:
160         if (old_state_half_turn!=state_half_turn){
161             steps_x_turn = steps_x;
162             steps_y_front_turn = steps_y_front;
163             steps_y_back_turn = steps_y_back;
164             old_state_half_turn=state_half_turn;
165         }
166         break;
167     default:
168         steps_x_turn = steps_x;
169         steps_y_front_turn = steps_y_front;
170         steps_y_back_turn = steps_y_back;
171         break;
172 }
173
174 if (buttonX_press) {
175     for (int n=0; n <= steps_x_turn; n++){
176         digitalWrite(X_DIR_PIN, HIGH);
177         digitalWrite(X_STEP_PIN, HIGH);
178         delayMicroseconds(speed_x);
179         digitalWrite(X_STEP_PIN, LOW);
```

```
180     }
181 }
182
183 if (button_Xfine1_press) {
184     for (int n=0; n <= fine_steps; n++){
185         digitalWrite(X_DIR_PIN, HIGH);
186         digitalWrite(X_STEP_PIN, HIGH);
187         delayMicroseconds(fine_speed);
188         digitalWrite(X_STEP_PIN, LOW);
189     }
190     delay (100);
191 }
192
193 if (button_Xfine2_press) {
194     for (int n=0; n <= fine_steps; n++){
195         digitalWrite(X_DIR_PIN, LOW);
196         digitalWrite(X_STEP_PIN, HIGH);
197         delayMicroseconds(fine_speed);
198         digitalWrite(X_STEP_PIN, LOW);
199     }
200     delay (100);
201 }
202
203 switch (state_y){
204     case 0:
205         if (old_state_y != state_y){
206             for (int n=0; n <= steps_y_front_turn; n++){
207                 digitalWrite(Y_DIR_PIN, HIGH);
208                 digitalWrite(Y_STEP_PIN, HIGH);
209                 delayMicroseconds(speed_y);
210                 digitalWrite(Y_STEP_PIN, LOW);
211             }
212             old_state_y = state_y;
213         }
214         break;
215     case 1:
216         if (old_state_y != state_y){
217             for (int n=0; n <= steps_y_front_turn; n++){
218                 digitalWrite(Y_DIR_PIN, LOW);
219                 digitalWrite(Y_STEP_PIN, HIGH);
```

```
220     delayMicroseconds(speed_y);
221     digitalWrite(Y_STEP_PIN, LOW);
222 }
223 old_state_y = state_y;
224 }
225 break;
226 case 2:
227     if (old_state_y != state_y){
228         for (int n=0; n <= steps_y_back_turn; n++){
229             digitalWrite(Y_DIR_PIN, LOW);
230             digitalWrite(Y_STEP_PIN, HIGH);
231             delayMicroseconds(speed_y);
232             digitalWrite(Y_STEP_PIN, LOW);
233         }
234         old_state_y = state_y;
235     }
236     break;
237 case 3:
238     if (old_state_y != state_y){
239         for (int n=0; n <= steps_y_back_turn; n++){
240             digitalWrite(Y_DIR_PIN, HIGH);
241             digitalWrite(Y_STEP_PIN, HIGH);
242             delayMicroseconds(speed_y);
243             digitalWrite(Y_STEP_PIN, LOW);
244         }
245         old_state_y = state_y;
246     }
247     break;
248 default:
249     break;
250 }
251
252 switch(state_led){
253     case 0:
254         if (old_state_led!=state_led)
255         {
256             setStripColor1(color_val_ring ,color_val_ring,
257                             color_val_ring);
258             setStripColor2(0,0,0,0);
259             old_state_led = state_led;
```

```
259     }
260     break;
261 case 1:
262     if (old_state_led!=state_led)
263     {
264         setStripColor1(0,0,0);
265         setStripColor2(0,0,0,0);
266         old_state_led = state_led;
267     }
268     break;
269 case 2:
270     if (old_state_led!=state_led)
271     {
272         setStripColor1(0,0,0);
273         setStripColor2(color_val_dome,color_val_dome,
274             color_val_dome,color_val_dome);
275         old_state_led = state_led;
276     }
277     break;
278 case 3:
279     if (old_state_led!=state_led)
280     {
281         setStripColor1(0,0,0);
282         setStripColor2(0,0,0,0);
283         old_state_led = state_led;
284     }
285     break;
286 default:
287     break;
288 }
```


Anexo J

Script da Câmara em Python

Código J.1: Rotina inicial de procura do fim de curso

```
from pyueye import ueye
import ctypes
import argparse

hcam = ueye.HIDS(0)
pccmem = ueye.c_mem_p()
memID = ueye.c_int()
hWnd = ctypes.c_voidp()
nret = ueye.is_InitCamera(hcam, hWnd)

if (nret==0):
    print ('Camera found')
else:
    print ('Camera disconnected or in use')
exit()

ueye.is_SetDisplayMode(hcam, ueye.IS_SET_DM_DIB)
sensorinfo = ueye.SENSORINFO()
ueye.is_GetSensorInfo(hcam, sensorinfo)
ueye.is_AllocImageMem(hcam, sensorinfo.nMaxWidth, sensorinfo.nMaxHeight, 12,
    pccmem, memID)
ueye.is_SetImageMem(hcam, pccmem, memID)

fps = 2
ueye.is_SetFrameRate(hcam, ueye.c_int(fps), ueye.c_double(fps))

parse=argparse.ArgumentParser()
parse.add_argument("-e", "--exposure", required=False, help="exposure time in ms
    , max. value depends on the FPS")
parse.add_argument("-G", "--gain", required=False, help="gain value (0-100%),
    default 0")
```

```

parse.add_argument("-g", "--gamma", required=False, help="gamma value (0-1000),
    default value 100 = 1.0 gamma")
args=vars(parse.parse_args())

if ((args["exposure"]==None):
    exposure = ueye.c_double(0)
else:
    exposure = ueye.c_double(float(args["exposure"]))
nret = ueye.is_Exposure(hcam, ueye.IS_EXPOSURE_CMD_SET_EXPOSURE, exposure, 8)
exposure_print = round(exposure,1)
print 'exposure time =', exposure_print, 'ms'

if ((args["gamma"]==None):
    gamma = ueye.c_int(100)
else:
    gamma = ueye.c_int(int(args["gamma"]))
nret = ueye.is_Gamma(hcam, ueye.IS_GAMMA_CMD_SET, gamma, ueye.sizeof(gamma))
gamma_val = round(float(gamma)/100,1)
print 'gamma =', gamma_val

if ((args["gain"]==None):
    gain = ueye.c_int(0)
else:
    gain = ueye.c_int(int(args["gain"]))
nret = ueye.is_SetHardwareGain(hcam, gain, ueye.IS_IGNORE_PARAMETER, ueye.
    IS_IGNORE_PARAMETER, ueye.IS_IGNORE_PARAMETER)
print 'master gain =', gain, '%'

ueye.is_SetColorMode(hcam, ueye.IS_CM_MONO8)

aoi_x = 0
aoi_y = 0
aoi_width = 2056
aoi_height = 1542
aoi_params = ueye.IS_RECT()
aoi_params.s32X = aoi_x
aoi_params.s32Y = aoi_y
aoi_params.s32Width = aoi_width
aoi_params.s32Height = aoi_height
nret = ueye.is_AOI(hcam, ueye.IS_AOI_IMAGE_SET_AOI, aoi_params, ueye.sizeof(
    aoi_params))
print 'resolution =', aoi_width, 'x', aoi_height

nret = ueye.is_FreezeVideo(hcam, ueye.IS_WAIT)

FileParams = ueye.IMAGE_FILE_PARAMS()
FileParams.pwchFileName = ("_output %sms.png" %exposure_print)
FileParams.nFileType = ueye.IS_IMG_PNG
FileParams.nQuality = 100

```

```
FileParams.ppcImageMem = None
FileParams.pnImageID = None

nret = ueye.is_ImageFile(hcam, ueye.IS_IMAGE_FILE_CMD_SAVE, FileParams, ueye.
    sizeof(FileParams))
if (nret==0):
    print ('Image Saved')
else:
    print ('Error')

ueye.is_FreeImageMem(hcam, pccmem, memID)
ueye.is_ExitCamera(hcam)
```

Bibliografia

- [1] A. Dubey, “Scope and Prospects of Non-Invasive Visual Inspection Systems for Industrial Applications,” vol. 9, pp. 1–11, 2016.
- [2] B. G. Batchelor, *Machine Vision Handbook*, B. G. Batchelor, Ed. London: Springer London, 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-1-84996-169-1_1
- [3] J. Bodenstab, “Machine vision for electronics manufacturing,” *Robotics age*, vol. 8, no. 9, pp. 21–25, 1986. [Online]. Available: <http://sfx.fe.up.pt/feup?sid=EI{%}3ACompendex{%}issn=0197-1905{%}date=1986{%}volume=8{%}issue=9{%}spage=21{%}epage=5{%}title=RoboticsEngineering{%}atitle=Machinevisionforelectronicsmanufacturing{%}auiat=Bodenstab{%}aufirst=J>
- [4] R. T. Chin, “Automated visual inspection: 1981 to 1987,” *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 41, no. 3, pp. 346–381, 1988. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0734189X88901089>
- [5] S. Świłło and M. Perzyk, “Automated Vision System for Inspection of Surface Casting Defects Based on Advanced Computer Techniques,” vol. 2, pp. 387–394, 2012.
- [6] A. Hornberg, *Handbook of Machine Vision*. Wiley-VCH, 2006.
- [7] N. Bonnot, R. Seulin, and F. Merienne, “Machine vision system for surface inspection on brushed industrial parts,” in *Electronic Imaging 2004*, vol. 5303. SPIE, 2004, p. 9.
- [8] B. Oswald-Tranta and M. Sorger, “Detection of subsurface defects in aluminium with thermo-inductive inspection,” in *Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIII, 26-28 April 2011*, ser. Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng. (USA), vol. 8013. Inst. for Autom., Univ. of Leoben, Leoben, Austria: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2011, p. 801310 (11 pp.). [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1117/12.887193>
- [9] S. J. Świłło and M. Perzyk, “Automatic inspection of surface defects in die castings after machining,” *Archives of Foundry Engineering*, vol. 11, no. 3, pp. 231–236, 2011.
- [10] W. Y. Wu and C. C. Hou, “Automated metal surface inspection through machine vision,” *The Imaging Science Journal*, vol. 51, no. 2, pp. 79–88, 2003. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/13682199.2003.11784415>

- [11] A. B. de Magalhães, “Introdução à Fundição,” 2006.
- [12] J. L. Mundy and G. B. Porter, “Visual inspection of metal surfaces,” in *Proceedings, Fifth International Conference on Pattern Recognition*, 1980, pp. 1493–1499.
- [13] D. S. MacKenzie and G. E. Totten, *Analytical Characterization of Aluminum, Steel, and Superalloys*. CRC Press, 2005. [Online]. Available: <https://books.google.pt/books?id=z47MBQAAQBAJ>
- [14] D. Mery and M. Carrasco, “Advances on Automated Multiple View Inspection,” ser. *Advances in Image and Video Technology*, W.-N. Lie, Ed. Berlin, Heidelberg LB - 10.1007/11949534_51: Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 513–522.
- [15] C. Pieringer and D. Mery, “Flaw detection in aluminium die castings using simultaneous combination of multiple views,” vol. 52, pp. 548–552, 2010.
- [16] A. Wilczek, P. Długosz, and M. Hebda, “Porosity Characterization of Aluminium Castings by Using Particular Non-destructive Techniques,” vol. - 34, no. - 3, pp. – 7, 2015.
- [17] Y. Frayman, H. Zheng, and S. Nahavandi, “Machine Vision System for Automatic Inspection of Surface Defects in Aluminum Die Casting,” vol. 10, pp. 281–286, 2006.
- [18] C. Fernández, C. Platero, P. Campoy, and R. Aracil, “Automated Visual Inspection of Non-Smooth Surfaces. Application to Cast Aluminum,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 28, no. 19, pp. 235–240, 1995. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667017450865>
- [19] C. Fernandez, C. Platero, P. Campoy, and R. Aracil, “Vision system for on-line surface inspection in aluminum casting process,” in *Proceedings of IECON '93 - 19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 15-19 Nov. 1993*, ser. *Proceedings of the IECON '93. International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation (Cat. No.93CH3234-2)*, vol. vol.3. Dept. of Syst. Electron., Univ. Politecnica de Madrid, Madrid, Spain: IEEE, 1993, pp. 1854–1859. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/IECON.1993.339356>
- [20] H. H. P. Wu, H. M. Sun, and R. Z. Zhao, “Surface defect detection for anodized aluminum tube based on automatic optical inspection,” pp. P59–P62, 2017.
- [21] E. N. Malamas, E. G. M. Petrakis, M. Zervakis, L. Petit, and J.-D. Legat, “A survey on industrial vision systems, applications and tools,” *Image and Vision Computing*, vol. 21, no. 2, pp. 171–188, 2003. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026288560200152X>
- [22] D. Mery and D. Filbert, “Classification of potential defects in the automatic inspection of aluminium using statistical pattern recognition,” 2002.

- [23] S. Satorres Martínez, C. Ortega Vázquez, J. Gámez García, and J. Gómez Ortega, “Quality inspection of machined metal parts using an image fusion technique,” *Measurement*, vol. 111, pp. 374–383, 2017. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224117305006>
- [24] S. J. Świłło and M. Perzyk, “Surface Casting Defects Inspection Using Vision System and Neural Network Techniques,” *Archives of Foundry Engineering*, vol. 13, no. 4, p. 103, 2013. [Online]. Available: <https://www.degruyter.com/view/j/afe.2013.13.issue-4/afe-2013-0091/afe-2013-0091.xml>
- [25] S. Arita, H. Takimoto, and H. Yamauchi, “Automatic Detection Method for Casting Defects Based on Gradient Features,” 2014.
- [26] L. Pizarro, D. Mery, R. Delpiano, and M. Carrasco, “Robust automated multiple view inspection,” *Pattern Analysis and Applications*, vol. 11, no. 1 LB - Pizarro2008, pp. 21–32, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s10044-007-0075-9>
- [27] S. Mersch, “Overview of Machine Vision Lighting Techniques,” in *Cambridge Symposium_Intelligent Robotics Systems*, vol. 0728. SPIE, 1987, p. 3.
- [28] N. Wittels and S. H. Zisk, “Lighting Design for Industrial Machine Vision,” in *Cambridge Symposium_Intelligent Robotics Systems*, vol. 0728. SPIE, 1987, p. 10.
- [29] H. Boerner and H. Strecker, “Automated X-ray inspection of aluminum castings,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 10, no. 1, pp. 79–91, 1988.
- [30] A. Novini, “Fundamentals of machine vision lighting,” in *WESCON’93. Conference Record*, 1993, pp. 44–52.
- [31] J. Ludlow, “Advanced Machine Vision Lighting,” 2016. [Online]. Available: [https://www.visiononline.org/userAssets/aiaUploads/file/CVP\[_\]Advanced-Vision-Lighting\[_\]Jonathan-Ludlow.pdf](https://www.visiononline.org/userAssets/aiaUploads/file/CVP[_]Advanced-Vision-Lighting[_]Jonathan-Ludlow.pdf)
- [32] D. Martin, “Basic Lighting Techniques for Machine Vision,” 2012. [Online]. Available: [https://www.visiononline.org/userAssets/aiaUploads/file/CVP\[_\]Beginning-Lighting-for-Machine-Vision\[_\]Daryl-Martin.pdf](https://www.visiononline.org/userAssets/aiaUploads/file/CVP[_]Beginning-Lighting-for-Machine-Vision[_]Daryl-Martin.pdf)
- [33] J. P. Yun, D. Kim, K. Kim, S. J. Lee, C. H. Park, and S. W. Kim, “Vision-based surface defect inspection for thick steel plates,” vol. 56. SPIE, 2017, p. 12.
- [34] D. Martin, “A Practical Guide to Machine Vision Lighting,” 2018. [Online]. Available: <https://www.advancedillumination.com/sites/all/themes/advill/images/resource/files/practicallightingv3.pdf>
- [35] M. T. Yan and B. W. Surgenor, “A Quantitative Study of Illumination Techniques for Machine Vision Based Inspection,” no. 44311, pp. 281–288, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1115/MSEC2011-50178>

- [36] Infaimon, “Formação Visão Artificial na Industria - Módulo 1,” 2017.
- [37] L. M. Jimenez and F. Torres, “Detection of defects in aluminum surface through computer vision techniques,” in *QCAV 97 1997 International Conference on Quality Control by Artificial Vision*, 28-30 May 1997, ser. QCAV 97. 1997 International Conference on Quality Control by Artificial Vision. Dept. of Syst. Eng. Commun., Alicante Univ., Alicante, Spain: Cepadues-Editions, 1997, pp. 381–385.
- [38] X. Deng, X. Ye, J. Fang, C. Lin, and L. Wang, “Surface Defects Inspection System Based on Machine Vision,” pp. 2205–2208, 2010.
- [39] M. Benmoussat, K. Spinnler, and M. Guillaume, “Surface defect detection of metal parts: Use of multimodal illuminations and hyperspectral imaging algorithms,” in *2012 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques Proceedings*, 2012, pp. 228–233.
- [40] V. Elango and L. Karunamoorthy, “Effect of lighting conditions in the study of surface roughness by machine vision - an experimental design approach,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 37, no. 1 LB - Elango2008, pp. 92–103, 2008. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s00170-007-0942-y>
- [41] T. Giesko and A. Zbrowski, “The use of optical technology for inspection of defects in industry,” vol. 31, pp. 69–78, 2011.
- [42] Basler AG, “Modern CMOS cameras as replacements for CCD cameras,” pp. 1–6, 2015. [Online]. Available: https://www.baslerweb.com/fp-1529921533/media/en/downloads/documents/white{_}papers/BAS1505{_}White{_}Paper{_}Benefits{_}of{_}CMOS.pdf
- [43] Cognex, “Introduction to machine vision. A guide to automating process & quality improvements,” 2016. [Online]. Available: https://www.assemblymag.com/ext/resources/White{_}Papers/Sep16/Introduction-to-Machine-Vision.pdf
- [44] IDS, “UI-3270CP Rev. 2 Camera,” 2018. [Online]. Available: <https://en.ids-imaging.com/store/ui-3270cp-rev-2.html>
- [45] Computar, “Simple FA Lens Selection,” 2017. [Online]. Available: <https://www.sodavision.com/wp-content/uploads/2017/02/computarwp3.pdf>
- [46] IDS, “IDS - Lens Finder,” 2018. [Online]. Available: <https://en.ids-imaging.com/ueye-lensfinder.html>
- [47] B. G. Batchelor, “HyperCard lighting advisor,” in *Photonics for Industrial Applications*, vol. 2347. SPIE, 1994, p. 9.
- [48] A. Novini, “Lighting And Optics Expert System For Machine Vision,” in *32nd Annual International Technical Symposium on Optical and Optoelectronic Applied Science and Engineering*, vol. 0974. SPIE, 1988, p. 6.

- [49] S. K. Kopparapu, “Lighting design for machine vision application,” *Image and Vision Computing*, vol. 24, no. 7, pp. 720–726, 2006. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0262885606000278>
- [50] A. V. V, “Adaptive Lighting for Machine Vision Applications,” in *2011 Canadian Conference on Computer and Robot Vision*, 2011, pp. 140–145.
- [51] F. Pernkopf and P. O’Leary, “Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces,” *NDT & E International*, vol. 36, no. 8, pp. 609–617, 2003. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0963869503000811>
- [52] V. Chauhan, H. Fernando, and B. Surgenor, “Effect of Illumination Techniques on Machine Vision Inspection for Automated Assembly Machines,” 2014.
- [53] Cognex, “Lighting Advisor,” 2018. [Online]. Available: <https://www.cognex.com/resources/interactive-tools/lighting-advisor>
- [54] L. Dongguang Opsco Optoelectronics CO., “SK6812RGBW Specification,” 2018. [Online]. Available: https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/2757/p2757_{_}SK6812RGBW_{_}REV01.pdf
- [55] Ooznest, “NEMA17 Stepper Motors,” 2018. [Online]. Available: <https://ooznest.co.uk/product/nema17-stepper-motors/>
- [56] —, “NEMA23 Stepper Motors,” 2018. [Online]. Available: <https://ooznest.co.uk/product/nema23-stepper-motors/>
- [57] RepRap, “RAMPS 1.4,” 2018. [Online]. Available: https://reprap.org/wiki/RAMPS_{_}1.4
- [58] T. Instruments, “DRV8825 Stepper Motor Controller IC,” 2014. [Online]. Available: <https://www.pololu.com/file/0J590/drv8825.pdf>
- [59] P. Corporation, “DRV8825 Stepper Motor Driver Carrier, High Current.” [Online]. Available: <https://www.pololu.com/product/2133>
- [60] M. Well, “85W Dual Output Switching Power Supply,” 2018. [Online]. Available: <https://pt.mouser.com/datasheet/2/260/RD-85-SPEC-1291492.pdf>
- [61] Effilux, “Datasheet EFFI-FLEX,” 2018. [Online]. Available: http://www.effilux.fr/documentation/doctechique/DATASHEET_{_}EFFI-FLEX_{_}V2.1.2018.pdf
- [62] R. Jain, R. Kasturi, and B. G. Schunck, *Machine vision*. McGraw-Hill New York, 1995, vol. 5.
- [63] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2001.